



**Maria Miguel Fidalgo  
Vechina**

**Estudo da geometria da aresta da ferramenta de  
corte durante a fresagem de aços com elevada  
dureza**







**Maria Miguel Fidalgo  
Vechina**

**Estudo da geometria da aresta da ferramenta de  
corte durante a fresagem de aços com elevada  
dureza**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva**

Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**

Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)



## Agradecimentos / Acknowledgements

Gostaria de prestar o devido agradecimento:

Ao meu orientador, com quem muito prezei trabalhar, Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, pela orientação, disponibilidade e partilha de conhecimentos.

Ao Engenheiro Renato Ferreira pela ajuda, disponibilidade e partilha de experiências.

Ao Engenheiro Daniel Figueiredo pela ajuda, disponibilidade, simpatia e partilha de experiências.

Ao Engenheiro Tiago Claudino pela ajuda, amizade e disponibilidade prestada.

Ao meu namorado pelo apoio, amizade e compreensão durante esta etapa da minha vida.

Aos meus pais que sempre me apoiaram incondicionalmente durante a realização do presente projeto.

Aos meus colegas, principalmente aos do *GRIDS*, pela ajuda, amizade e disponibilidade prestada.



## Palavras-chave

*Hard Milling*; Fresagem; Geometria da Aresta de Corte; Acabamento Superficial; Desgaste da Ferramenta; Aços Endurecidos

Este projeto curricular consiste num estudo acerca do efeito da geometria da aresta de corte na superfície maquinada e do seu respetivo desgaste, através da realização de ensaios de fresagem a alta velocidade numa operação de acabamento a seco no aço AISI D2, em dois estados endurecidos, 55 e 61 HRC. Foram utilizadas três ferramentas de corte de metal duro revestidas por PVD, duas delas por  $AlTiN$  e outra por  $TiAlN + TiN$ . A diferença entre as ferramentas de corte estava na sua geometria. Raio de ponta, zona da aresta de corte a  $90^\circ$  (face alisadora) e preparação da aresta negativa (chanfro) foram as características a serem estudadas.

Foram realizados ensaios de corte longos e curtos. Os primeiros visaram avaliar o desgaste da ferramenta (VB) de modo a obter a curva de desgaste, numa operação onde as ferramentas maquinam em superfícies planas com diferentes durezas. Os ensaios curtos permitiram avaliar a rugosidade da superfície maquinada onde a ferramenta maquinou em dois tipos de superfície, nomeadamente plana vertical e 3D.

Efetuuou-se um estudo e levantamento geométrico da ferramenta de corte já existente, que por sua vez, foi modelada com recurso ao *software* CAD, *SolidWorks*. Posteriormente, no âmbito do projeto curricular, desenvolveu-se uma nova ferramenta de corte que pudesse conjugar todas as características das ferramentas de corte utilizadas, nomeadamente o raio de ponta, a face alisadora e chanfro.

Concluiu-se que, para maquinagens em superfície plana vertical, a ferramenta com a geometria com menor raio de ponta e face alisadora apresentou maior tempo de maquinagem e menor valor de rugosidade, mesmo com o aumento da dureza do material. No entanto, para maquinagens em superfícies 3D, a referida ferramenta não é aconselhável.

Ferramentas de corte com raios de ponta elevados, com faces alisadoras e chanfros representaram ferramentas capazes de maquinar superfícies 3D e, por sua vez, obter valores de rugosidade média aritmética abaixo do valor proposto. Contudo, para maquinagens em superfícies planas, estas apresentaram os menores tempos de maquinagem até a obtenção do  $VB_{max}$  e maiores valores de rugosidade na superfície maquinada.





## Keywords

Hard Milling; Milling; Cutting Edge Geometry; Surface Finish; Cutting Tool Wear; Hardened Steels

## Abstract

This curricular project consists on a study about the effect of the cutting edge's geometry in the machined surface and its respective wear, through the completion of milling tests with a high speed machine in a dry finishing operation on AISI D2 steel, in two hardened states, 55 and 61 HRC. Three hard metal cutting tools, coated with PVD, two of them with  $AlTiN$  and another with  $TiAlN + TiN$ . The difference between the cutting tools were in their geometry. Radius edge, cutting edge zone at  $90^\circ$  (face straightener) and the negative preparation edge (chamfer) were the characteristics to be studied.

Long and short cut tests were conducted. The first aimed to evaluate the tool wear (VB) in order to obtain the wear curve, in an operation where the tools are used on flat surfaces with different hardness values. The short test allowed to evaluate the roughness of the machined surface on two types of surface, vertical flat and 3D.

It was performed a geometric survey of a cutting tool available in the market which, in turn, was modeled using a CAD software, *SolidWorks*. Later, in the context of the curricular project, a new cutting tool was developed, in a way that could bring together all the characteristics of the cutting tools used, mainly the radius, the face straightener and chamfer.

It was concluded that, while machining vertical flat surfaces, a tool geometry with smaller radius of edge and face straightener, there was an increased machining time and the lowest value of surface roughness, even with the increase of the material hardness. This tool allowed, for the same conditions, to obtain a better surface finish with good dimensional accuracy. However, for 3D machining, this tool is not advisable.

Tools with high edge radius, face straightener and chamfer are tools capable of 3D surface machining and get values of arithmetic surface roughness below the expected. However, for flat surface machining, this tool obtained smaller machining time until the achievement of the  $VB_{max}$  and higher values of surface roughness in the machined surface.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Generalidades . . . . .	1
1.2	Empresa <i>Palbit</i> . . . . .	3
1.3	Objetivos . . . . .	4
1.4	Organização do Projeto . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão do Estado da Arte - <i>Hard Milling</i></b>	<b>7</b>
2.1	<i>Hard Machining</i> . . . . .	7
2.1.1	Definição . . . . .	7
2.1.2	<i>Hard Milling</i> . . . . .	7
2.1.3	Evolução do processo <i>Hard Milling</i> na Prática Industrial . . . . .	8
2.2	Materiais para Ferramentas de Corte de Materiais Endurecidos . . . . .	9
2.2.1	Metal Duro . . . . .	10
2.3	Processos de Revestimentos . . . . .	10
2.4	Revestimentos para Ferramentas de Corte . . . . .	12
2.5	Geometria da Ferramenta . . . . .	12
2.5.1	Preparação da Aresta de Corte . . . . .	15
2.6	Desgaste e Vida das Ferramentas de Corte . . . . .	16
2.6.1	Desgaste da Ferramenta na Fresagem . . . . .	17
2.6.2	Tempo de Vida da Ferramenta . . . . .	21
2.7	Integridade Superficial . . . . .	24
2.7.1	Acabamento Superficial . . . . .	24
2.8	Síntese . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Procedimento Experimental</b>	<b>29</b>
3.1	Material utilizado para a realização dos ensaios de corte . . . . .	29
3.1.1	Aço AISI D2 . . . . .	29
3.2	Máquina-Ferramenta . . . . .	31
3.3	Ferramentas de corte utilizadas . . . . .	32
3.3.1	Alongadores . . . . .	34
3.4	Ensaio Realizados . . . . .	35
3.4.1	Ensaio Curtos . . . . .	36
3.4.2	Ensaio Longos . . . . .	37
3.5	Parâmetros de Corte . . . . .	38
3.6	Procedimentos Antes de Maquinar . . . . .	39
3.6.1	Medição e Inspeção da Ferramenta de Corte . . . . .	39
3.6.2	Elaboração do Programa CAM . . . . .	40

3.6.3	Procedimento realizado na Máquina-Ferramenta . . . . .	41
3.7	Método para caracterização da superfície . . . . .	41
3.8	Método para Avaliação do Desgaste . . . . .	42
3.9	Levantamento Geométrico da Ferramenta de Corte - Amostra 2 . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Análise e Discussão de Resultados</b>	<b>47</b>
4.1	Desenvolvimento de uma nova Ferramenta de corte . . . . .	47
4.1.1	Desenho Técnico . . . . .	48
4.1.2	Desenvolvimento do suporte . . . . .	48
4.2	Avaliação dos Adaptadores no Acabamento Superficial . . . . .	49
4.3	Avaliação do Desgaste das Ferramentas de Corte . . . . .	50
4.3.1	Desgaste da Ferramenta de Corte - Amostra 1 . . . . .	52
4.3.2	Desgaste da Ferramenta de Corte - Amostra 2 . . . . .	53
4.3.3	Desgaste da Ferramenta de Corte - Amostra 3 . . . . .	54
4.3.4	Análise Comparativa . . . . .	55
4.4	Avaliação da Rugosidade Superficial . . . . .	58
4.4.1	Rugosidade Superficial da Superfície Plana Vertical . . . . .	58
4.4.1.1	Comportamento das Ferramentas de Corte - Dureza 55 HRc . . . . .	60
4.4.1.2	Comportamento das Ferramentas de Corte - Dureza 61 HRc . . . . .	62
4.4.1.3	Análise Comparativa . . . . .	63
4.4.2	Rugosidade Superficial da Superfície 3D . . . . .	64
4.4.2.1	Análise da Rugosidade Superficial - Amostra 2 . . . . .	68
4.4.2.2	Análise da Rugosidade Superficial - Amostra 3 . . . . .	69
4.4.2.3	Análise Comparativa . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>73</b>
5.1	Conclusões . . . . .	73
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	75
<b>A</b>		<b>81</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Valores limites de desgaste recomendáveis na prática para diferentes materiais de ferramenta. (Astakhov and Davim [2008]) (adapt.) . . . . .	21
2.2	Valores de $n$ observados na utilização de diferentes materiais de ferramenta. (Astakhov and Davim [2008]) . . . . .	22
3.1	Designação do aço AISI D2 nas diversas normas. . . . .	29
3.2	Composição química do aço AISI D2 utilizando % em peso. . . . .	30
3.3	Propriedades Mecânicas do aço AISI D2. . . . .	30
3.4	Características da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios. . . . .	32
3.5	Informações detalhadas das amostras e respetivos suportes. . . . .	33
3.6	Parâmetros de corte utilizados nos ensaios preliminares realizados no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. . . . .	38
3.7	Parâmetros de corte utilizados nos ensaios longos realizados no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. . . . .	39
3.8	Parâmetros de corte utilizados nos ensaios longos realizados no aço AISI D2 de dureza 61 HRc. . . . .	39
3.9	Parâmetros de corte utilizados nos ensaios curtos, na superfície plana vertical e na 3D, realizados no aço AISI D2 de dureza 55 e 61 HRc. . . . .	39
4.1	Aspeto visual das superfícies maquinadas com diferentes parâmetros de corte no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. . . . .	50
4.2	Representação das superfícies maquinadas da Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 55 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	69
4.3	Representação das superfícies maquinadas da Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 61 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	69
4.4	Representação das superfícies maquinadas da Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 55 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	70
4.5	Representação das superfícies maquinadas da Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 61 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	71
A.1	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 1 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc . . . . .	84
A.2	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. . . . .	84

A.3	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. . . . .	85
A.4	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 1 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc . . . . .	85
A.5	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc . . . . .	86
A.6	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc . . . . .	86
A.7	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc . . . . .	87
A.8	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc . . . . .	87
A.9	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc . . . . .	88
A.10	Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc . . . . .	88

# Lista de Figuras

1.1	Percentagem de tempos na produção de moldes/matrizas/punções. (Fallböhmer et al. [2000]) . . . . .	1
1.2	Empresa <i>Palbit</i> . . . . .	3
1.3	Representação 2D das amostras utilizadas nos ensaios e respectivos parâmetros a avaliar. (a) Raio de ponta; b) Chanfro; c) Face alisadora). . . . .	5
2.1	Comparação relativa da resistência ao desgaste abrasivo dos materiais da ferramenta. (Stephenson and Agapiou [2016]) (adapt.) . . . . .	9
2.2	Representação esquemática dos processos CVD e PVD. (Smith [2008]) . . . . .	11
2.3	Três diferentes combinações dos ângulos de ataque, radial e axial. (Stephenson and Agapiou [2016]) (adapt.) . . . . .	14
2.4	Formação da apara nas três diferentes combinações dos ângulos de ataque, radial e axial. A- Negativa/Positiva; B- Duplamente Negativa; C- Duplamente Positiva. (Smith [2008]) . . . . .	14
2.5	Representação de todos os ângulo necessários numa combinação negativa/positiva. . . . .	15
2.6	Diferentes tipos de preparação da aresta. 1. Sem preparação, 2. Raio de ponta, 3. Chanfro e 4. Raio de ponta e chanfro. (Oliveira [2007]) (adapt.) . . . . .	16
2.7	Influência do raio de ponta na vida útil da ferramenta e na rugosidade da superfície maquinada. Fulemova and Janda [2014] (adapt.) . . . . .	16
2.8	Representação esquemáticas dos tipos de mecanismos referidos anteriormente. 1) Abrasão, 2) Difusão e 3) Oxidação (Sandvik Coromant [1994]) (adapt.) . . . . .	17
2.9	Formas típicas de degradação das ferramentas de corte. 1. Desgaste da aresta, 2. Deformação da aresta, 3. Fendas Térmicas, 4. Cratera na face de ataque, 5. Esmilhamento, 6. Fratura, 7. Aresta postiça de corte, 8. Fratura catastrófica. (Palbit [2017a]) . . . . .	17
2.10	Tipos de desgates identificados por Kundor et al. [2016] a uma velocidade de corte de 95 m/min e um avanço de 0.04 mm/dente. . . . .	19
2.11	Tipos de desgates identificados por Kundor et al. [2016] a velocidades de corte de 80 e 50 m/min e avanços de 0.02 e 0.04 mm/dente respetivamente. . . . .	20
2.12	Ensaio realizados por Jasni et al. [2012] para análise de desgaste típicos a diferentes parâmetros de corte. . . . .	21
2.13	Medição do desgaste após remoção de 1200 mm <sup>3</sup> de material. (Aslan [2005]) (adapt.) . . . . .	23
2.14	<i>Performance</i> de diferentes materiais de corte na fresagem a altas velocidades do aço D2. (Fallböhmer et al. [2000]) . . . . .	23

2.15	Maquinagem e parâmetros de corte afetam a integridade superficial. (Saini et al. [2012]) (adapt.) . . . . .	24
2.16	Evolução da rugosidade e do desgaste de flanco em função do tempo de corte. Kundor et al. [2016] (adapt.) . . . . .	26
3.1	Provetes de aço AISI D2. a) Provete para os ensaios da superfície plana vertical, b) Provete para os ensaios da superfície 3D. . . . .	31
3.2	Centro de maquinagem MAS MCV 1270 utilizado nos ensaios. (Cortesia-Palbit) . . . . .	31
3.3	Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. a) Amostra 1, b) Amostra 2, c) Amostra 3. . . . .	32
3.4	Suportes das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. a) Suporte da amostra 1, b) Suporte da amostra 2, c) Suporte da amostra 3. . . . .	33
3.5	Vista de trabalho dos suportes das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. a) Suporte da amostra 1 (vista de trabalho), b) Suporte da amostra 2 (vista de trabalho), c) Suporte da amostra 3 (vista de trabalho). . . . .	34
3.6	Cone hidráulico utilizado ( <i>SCHUNK</i> - ISO 50). . . . .	34
3.7	Adaptadores utilizados nos ensaios. . . . .	35
3.8	Representação do ensaio curto na superfície plana vertical para avaliação da rugosidade. . . . .	36
3.9	Cilindro após torneamento da superfície 3D. . . . .	37
3.10	Representação do ensaio curto em superfície 3D para avaliação da rugosidade. . . . .	37
3.11	Representação dos ensaios longos para avaliação do desgaste da ferramenta. . . . .	38
3.12	Máquina universal de medição, " <i>Venturion</i> " da <i>Zoller</i> . (Cortesia-Palbit) . . . . .	40
3.13	Elaboração do programa CAM. a) Elaboração do programa no <i>MasterCam X9</i> , b) Elaboração do código em linguagem Heidenhain. . . . .	41
3.14	Procedimento realizado na CNC. a) Zero peça do cilindro, b) Apalpação da ferramenta. . . . .	41
3.15	Rugosímetro <i>Tesa-Rugosurf 10-G</i> . (Cortesia-Palbit) . . . . .	42
3.16	Microscópio Digital <i>Dino-Lite Digital Microscope</i> . (Cortesia-Palbit) . . . . .	43
3.17	Esboço realizado para levantamento geométrico da amostra. . . . .	44
3.18	Projector de perfil ótico: <i>Mitutoyo PJ-A3000 Vertical Profile</i> (Cortesia-Palbit). . . . .	45
3.19	Projector de perfil digital: <i>Micro-Vu Vertex Multisensor Measuring Center</i> . (Cortesia-Palbit). . . . .	45
3.20	Equipamento de medição por coordenadas 3D, <i>ZEISS DuraMax</i> (Cortesia-Palbit). . . . .	46
3.21	Ficheiro CAD fornecido pelo equipamento <i>ZEISS DuraMax</i> (Cortesia-Palbit). . . . .	46
4.1	Modelação da amostra 3. . . . .	48
4.2	Suporte utilizado para a amostra 3, assim como a marcação da retificação. . . . .	49
4.3	Suporte com as respetivas alterações. . . . .	49
4.4	Curvas de vida das ferramentas de corte para o aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro) . . . . .	51



4.5	Curvas de vida das ferramentas de corte para o aço AISI D2 de dureza 61HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro) . . . . .	52
4.6	Evolução do desgaste da amostra 1 (250x) no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora) . . . . .	52
4.7	Evolução do desgaste da amostra 1 (250x) no aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora) . . . . .	53
4.8	Zona de contacto da amostra 1 com a peça. . . . .	53
4.9	Evolução do desgaste da amostra 2 (250x) no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro) . . . . .	53
4.10	Evolução do desgaste da amostra 2 (250x) no aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro) . . . . .	54
4.11	Zona de contacto da amostra 2 com a peça. . . . .	54
4.12	Evolução do desgaste da amostra 3 (250x) no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro) . . . . .	54
4.13	Evolução do desgaste da amostra 3 (250x) no aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro) . . . . .	55
4.14	Zona de contacto da amostra 3 com a peça. . . . .	55
4.15	Tempos de corte de cada amostra até à obtenção do critério de vida adotado. . . . .	56
4.16	Evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente, do aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro) . . . . .	59
4.17	Evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente, do aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro) . . . . .	60
4.18	Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 55 HRc pela a Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora), a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	61
4.19	Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 55 HRc pela a Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	61
4.20	Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 55 HRc pela a Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	62
4.21	Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 61 HRc pela a Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$ mm e face alisadora), a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	62
4.22	Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 61 HRc pela a Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$ mm e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	63
4.23	Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 61 HRc pela a Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min. . . . .	63
4.24	Deslocamento efetuado pelo rugosímetro na superfície 3D . . . . .	65

4.25	Evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente para o aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 2 ( $r_\varepsilon=2.0$ mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\varepsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro).	65
4.26	Evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente para o aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 2 ( $r_\varepsilon=2.0$ mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\varepsilon=2.0$ mm, face alisadora e chanfro).	66
4.27	Relevo efetuado pela amostra 1 na superfície maquinada.	67
4.28	Superfície 3D maquinada pela amostra 1 na dureza 55 HRc.	67
4.29	Superfície 3D maquinada pela amostra 1 na dureza 61 HRc.	68
A.1	Relatório de Ensaio da <i>Ramada Aços</i> .	81
A.2	Estrutura e dimensões dos adaptadores. (Palbit [2017b])	82
A.3	Desenho técnico da amostra 3. (Apenas se encontram representadas algumas cotas devido ao acordo de confidencialidade proposto durante o decorrer do projeto curricular)	83

# Nomenclatura

## Lista de Abreviaturas

AISI	<i>American Iron and Steel Institut</i>
AlTiN	Nitreto de Alumínio e Titânio
Co	Cobalto
CVD	Deposição Química em fase de Vapor
DIN	<i>Deutsches Institut fur Normung</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
EURONORM	<i>European Norm</i>
HM	<i>Hard Machining</i>
HRC	Escala de Rockwell
HSP	<i>High Speed Machining</i>
PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
PVD	Deposição Física em fase de Vapor
Ra	Rugosidade Média Aritmética
Rt	Amplitude Máxima de Rugosidade
Rz	Profundidade Média da Rugosidade
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
UNE	<i>Una Norma Espanola</i>
WC	Carboneto de Tungstênio

## Lista de Símbolos

$\alpha$	Ângulo de Folga
$\gamma$	Ângulo de Ataque

$\gamma_o$	Ângulo de Ataque Efetivo
$\gamma_{axial}$	Ângulo de Ataque Axial
$\gamma_{radial}$	Ângulo de Ataque Radial
$\kappa_r$	Ângulo de Posição da Aresta de Corte
$\lambda$	Ângulo de Inclinação
$\mu m$	Micrómetro
$fz$	Avanço por Dente
$mm$	Milímetro
$r_\varepsilon$	Raio de Ponta
$S$	Secção da Apara
$T$	Vida da Ferramenta
$t_c$	Tempo de Corte
$V_c$	Velocidade de Corte

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Generalidades

Na indústria de moldes, matrizes e punções, a utilização dos processos de maquinagem têm vindo a ser evidenciada ao longo do tempo, especialmente a operação de fresagem. Nesta área, o tempo de maquinagem e o acabamento ocupam aproximadamente dois terços do tempo de produção e custos, como é possível visualizar na Figura 1.1, (Fallböhmer et al. [2000]).

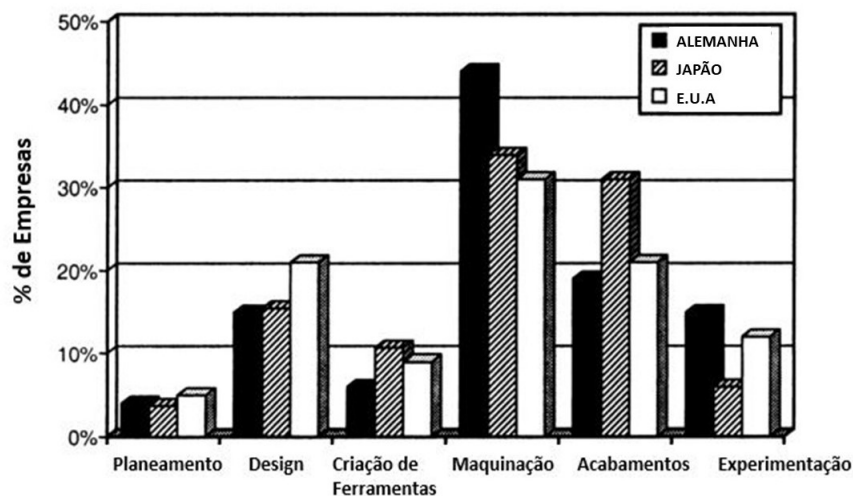


Figura 1.1: Percentagem de tempos na produção de moldes/matrizes/punções. (Fallböhmer et al. [2000])

De acordo com López de Lacalle et al. [2011], antes da utilização do *High Speed Machining* (HSM) a tecnologia que estava implementada na produção de moldes e matrizes era a combinação de métodos convencionais e processos de eletro-erosão. De 1997 a 1999, o procedimento consistia no desbaste e semi-acabamento feitos em máquinas convencionais, com o material do molde num estado recozido, antes de ser temperado. Posteriormente, eram aplicados tratamentos térmicos e, por fim, o acabamento era rea-

lizado numa máquina de alta velocidade. Existiam duas razões para esta sequência:

- O desbaste, sendo uma operação que apresentava pouca precisão como requisito, era feito em máquinas cujo custo por hora era inferior cinco vezes se fosse feito numa máquina a alta velocidade. O desgaste da ferramenta era pouco significativo, devido ao facto da mesma maquinar aços de pouca dureza.
- Os fusos das árvores mais usuais de uma máquina-ferramenta, apenas apresentavam uma rotação de *spindle* de 1500 rpm, sendo impossível realizar o desbaste.

Em 2000, foram introduzidas melhorias nas árvores das máquinas-ferramentas passando estas a serem capazes de fornecer torque suficiente. Iniciava-se o processo com um bloco previamente tratado termicamente, sendo todas as operações realizadas numa só máquina. Assim, o procedimento tornou-se mais vantajoso, uma vez que a produção de um molde era executado em menor tempo. De Lacalle et al. [2002] afirmam que os processos HSM e EDM competem entre si e são dois os fatores envolvidos nessa competição:

- Sob o ponto de vista de custo e tempo, HSM apresenta mais vantagens;
- Sob o ponto de vista de precisão dimensional e rugosidade, HSM depende de vários fatores como a precisão da máquina, a deflexão e o equilíbrio da ferramenta. Já o EDM depende do desgaste do eletrodo; em alguns casos são utilizados dois eletrodos, um para o desbaste e outro para o acabamento.

A maior vantagem do HSM sobre o EDM está relacionada com a taxa de remoção de material, o que significa uma redução enorme no tempo de fabrico e, conseqüentemente, nos custos para a produção. Na indústria de moldes, onde existem determinados requisitos técnicos, a aplicação da fresagem em aços endurecidos acarreta sempre vantagens, tais como: possibilidade de trabalhar com velocidades de corte elevadas, obtenção de elevadas taxas de remoção de material, resultando em forças de corte baixas e melhor acabamento superficial. No entanto, isto aumenta significativamente o desgaste da ferramenta, (Deonísio [2004]).

A utilização de ferramentas avançadas para a maquinagem de aços endurecidos é também um fator de elevada importância. Nas últimas duas décadas, um enorme desenvolvimento tecnológico foi alcançado na maquinagem e surgiu a necessidade de maquinar novos materiais. Atualmente, existem no mercado ferramentas de aço rápido, carboneto sinterizado ou metal duro (com ou sem revestimento), cermet, cerâmicas (normalmente reforçadas com fibras), CBN (nitreto de boro cúbico) e PCD (diamante policristalino). Mais de 70% das ferramentas de metal duro são revestidas por processos PVD ou CVD, existindo uma grande variedade de revestimentos disponíveis no mercado, como: TiC, TiN, TiAlN, TiCN, entre outros, (Rodrigues [2005]).

Vários estudos sobre a geometria da aresta de corte (Denkena and Biermann [2014], Endres and Kountanya [2002] e Wu et al. [2016]) já foram efetuados com a finalidade de maximizar a vida da ferramenta. Pequenas modificações na aresta de corte podem aumentar a sua resistência, prolongando o tempo de vida desta, e conseqüentemente, obtenção de melhor acabamento superficial. Diversos elementos podem ser modificados, desde o raio de curvatura da ponta ( $r_\epsilon$ ), ângulo de ataque ( $\gamma$ ), ângulo de saída ( $\alpha$ ),

ângulo de inclinação da aresta ( $\lambda$ ), ângulo de posição da aresta de corte ( $\kappa_r$ ), a utilização de raio na aresta de corte ou uso de chanfro e composição do substrato das ferramentas.

É importante realizar estudos com operações de fresagem numa máquina a alta velocidade, de modo a perceber o comportamento da ferramenta num material com dureza superior a 55 HRC, variando as suas condições de corte, como: velocidade de corte, velocidade de avanço, largura e profundidade de corte, dureza do material a maquinar e a geometria da ferramenta, tendo sempre presente o desgaste e a curva útil de vida da ferramenta, bem como o seu acabamento superficial.

O presente estudo de fresagem, tem como objetivo ajudar a entender o efeito da geometria da aresta de corte na maquinação de aços endurecidos em diferentes superfícies, assim como entender de que forma esta influencia a rugosidade da superfície e o desgaste da ferramenta em diversos tipos de dureza (onde se torna mais significativo), utilizando os parâmetros de corte mais adequados, de modo a obter um desempenho satisfatório. Este estudo foi realizado na empresa *Palbit*, com equipamentos utilizados em meio industrial, de modo a satisfazer as necessidades desta, bem como o assunto do projeto curricular.

## 1.2 Empresa *Palbit*

A *Palbit*, inicialmente Minas e Metalurgia, dedicada ao setor da metalomecânica, situada no lugar do Palhal, freguesia de Branca, concelho de Albergaria-a-Velha e distrito de Aveiro, formou-se para assegurar a concessão da exploração das Minas de Galena do Palhal e a indústria e comércio de metais e seus derivados.



Figura 1.2: Empresa *Palbit*.<sup>1</sup>

A *Palbit*, iniciou a sua atividade em 1916. Em 1941 foi adquirida pelo Grupo SA-PEC, para se expandir na exploração mineira de outras minas do grupo, criando a área de negócios de ferramentas para pedreiras, produzindo as respetivas ferramentas. Em 1952, começou a produzir peças acabadas em metal duro e outros equipamentos e ferramentas. Contudo, rapidamente estendeu a sua produção às pastilhas e ferramentas de corte (torneamento, fresagem, furação, etc.), assim como o material anti-desgaste e ferramentas para tratamento de pedra, tendo sempre como base o metal duro.

Estão hoje presentes em todo o mundo através de uma rede de distribuidores, desde África, América, Ásia, Europa e Oceânia, e com uma equipa de técnicos qualificados, que

---

<sup>1</sup><http://www.palbit.pt>

permite responder às exigências dos clientes, sendo um fornecedor completo de soluções em metal duro, ultra duro e aços.

A indústria de moldes e matrizes é um setor que requer um considerável número de competências devido do vasto tipo de aplicações (injeção e estampagem de moldes, forjamento e fundição de matrizes, etc.) e a variedade de tipos de materiais (aços, aços endurecidos, alumínio e metais não ferrosos, ferros fundidos e ferros fundidos nodulares).

A *Palbit* apresenta uma vasta experiência neste tipo de indústria, trabalhando com as maiores empresas do mercado. Esta pretende oferecer as melhores soluções para aumentar a sua rentabilidade com processos otimizados, de forma a reduzir custos e tempos de produção.

### 1.3 Objetivos

Com este projeto curricular pretende-se avaliar a influência da geometria da aresta de corte na superfície maquinada, através da realização de ensaios de fresagem a alta velocidade numa operação de acabamento a seco, no aço AISI D2, em dois estados endurecidos, 55 e 61 HRc. Serão utilizadas três ferramentas de corte: uma da *Palbit* (Amostra 1), uma do mercado (Amostra 2) e outra desenvolvida no âmbito do projeto curricular (Amostra 3). As três ferramentas foram disponibilizadas e desenvolvidas pela entidade acolhedora *Palbit*.

Este projeto foi feito tendo como alvo os seguintes objetivos:

- Estudar a geometria da aresta de corte;
- Avaliar o acabamento da superfície maquinada;
- Avaliar o desgaste da ferramenta de corte;
- Avaliar o comportamento das ferramentas na maquinagem de aços de diferentes durezas.

Com base nos objetivos anteriormente enunciados, pretende-se ainda avaliar a preparação da aresta de corte (o raio de ponta, a zona da aresta de corte com um ângulo de posição de 90°, que doravante será designada por face alisadora e a preparação da aresta negativa, que no decorrer do texto será designada por chanfro) numa pastilha. O raio de ponta de uma ferramenta de corte é conhecido como um dos principais parâmetros que afeta a superfície maquinada. Como é possível visualizar na Figura 1.3, a diferença entre as pastilhas está no raio de ponta possuir ou não face alisadora, e na utilização ou não de chanfro.



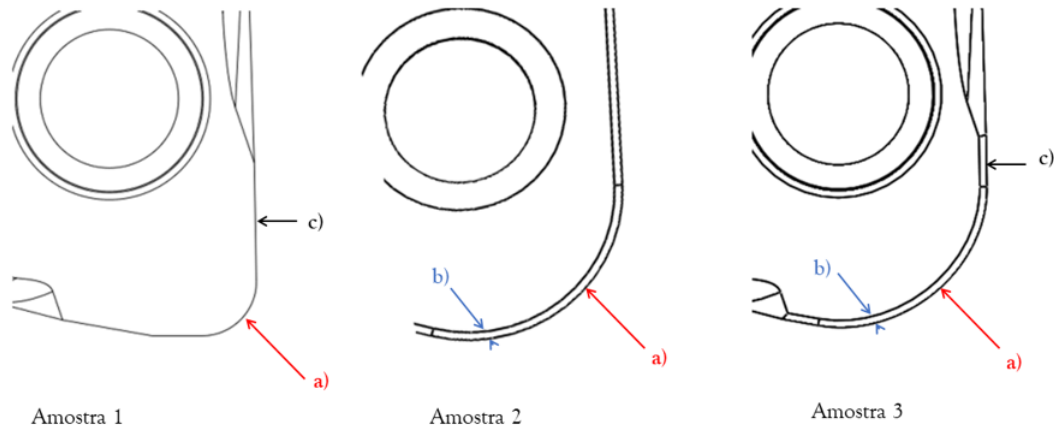


Figura 1.3: Representação 2D das amostras utilizadas nos ensaios e respectivos parâmetros a avaliar. (a) Raio de ponta; b) Chanfro; c) Face alisadora).

Segundo muitos estudos, existe um efeito claro do raio de ponta no desgaste. Fulemova and Janda [2014] afirmaram que a aresta de corte com maior raio de ponta atinge a maior curva de vida e o menor valor de rugosidade. Endres and Kountanya [2002] afirmaram que com a diminuição do avanço e aumento do raio de ponta da ferramenta, existe uma diminuição significativa do desgaste da ferramenta. É ainda de salientar que, para operações de acabamento, a geometria da ferramenta de corte é caracterizada por um ângulo de ataque negativo, reforçada com um chanfro na aresta de corte, para evitar o lascamento devido às tensões de corte (Hashmi [2017]).

Pretende-se ainda efetuar um estudo pormenorizado das ferramentas, desde os seus componentes do substrato e revestimentos das pastilhas, até à sua geometria.

Após a realização dos ensaios, tenciona-se demonstrar a que melhor acabamento superficial, desempenho e durabilidade apresenta, de modo a orientar para a melhor escolha, ou seja, qual a melhor combinação de elementos em estudo: Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro) ou Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro).

## 1.4 Organização do Projeto

O presente projeto encontra-se dividido em seis capítulos e está organizado da seguinte forma:

- No **Capítulo 1 "Introdução"** é efetuado uma introdução à empresa e ao assunto do presente projeto, seguida dos objetivos definidos.
- No **Capítulo 2 "Revisão do Estado de Arte"** é feita uma revisão bibliográfica, onde é apresentado um histórico e conceitos sobre tudo o que se vai tratar no presente projeto.
- No **Capítulo 3 "Procedimento Experimental"**, é feita uma apresentação do material em estudo, bem como das ferramentas e equipamentos técnicos utiliza-

dos. São apresentados os procedimentos experimentais e os parâmetros de corte utilizados.

- No **Capítulo 4 "Análise e Discussão dos Resultados"**, é feita uma apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos.
- No **Capítulo 5 "Considerações Finais"**, são apresentadas as conclusões gerais do presente projeto e apresentam-se também algumas propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Revisão do Estado da Arte - *Hard Milling*

A revisão bibliográfica que se segue tem como meta apresentar um histórico e conceitos sobre o principal processo de maquinagem relacionado com o desenvolvimento deste projeto. Dessa forma, os fundamentos mais relevantes de operações de fresagem e maquinagem de aços endurecidos serão abordados, desde a sua história mais clássica a estudos mais recentes, mediante a análise de livros e artigos publicados em revistas de maior importância no cenário científico. Maquinagem a alta velocidade com ferramentas de corte, neste caso fresas e fatores que influenciam o desgaste destas, geometria de corte, são alguns dos assuntos referidos nesta revisão.

### 2.1 *Hard Machining*

#### 2.1.1 Definição

O processo de maquinagem de materiais endurecidos é definido como sendo um processo de *Hard Machining* (HM), sendo um processo recente que pode ser definido como operações de maquinagem de materiais, em que as suas durezas variam entre os 45 e os 65 HRC e onde são utilizadas ferramentas com geometrias de aresta de corte adaptadas a este tipo de operação. Esta operação representa um desafio quer na seleção do porta-ferramenta ou suporte, quer das pastilhas, pois uma escolha acertada facilita a resistência ao desgaste e aumenta a precisão da maquinagem (Astakhov [2011]).

#### 2.1.2 *Hard Milling*

No caso mais específico, à fresagem é aplicado o termo de *Hard Milling*. A operação de fresagem é realizada usando uma ferramenta rotativa com múltiplas arestas de corte, estas podem ser inteiriças ou apresentarem acoplamentos para pastilhas.

De acordo com Astakhov [2011], nos últimos anos a fresagem em materiais endurecidos tem capturado a atenção de vários fabricantes da indústria de moldes e matrizes em todo o mundo, e com os novos avanços na tecnologia, materiais com dureza compreendida entre 45 e 64 HRC podem ser diretamente maquinados numa máquina-ferramenta.

### 2.1.3 Evolução do processo *Hard Milling* na Prática Industrial

*Hard milling* aponta grandes vantagens quando comparada com métodos tradicionais de remoção de material, principalmente em operações de acabamento e polimento em peças que já tenham sido tratadas termicamente.

Astakhov [2011] afirmou que o método convencional para acabamento de aços endurecidos, é o processo de retificação. Contudo, existe um número de benefícios para maquinar estes materiais duros com ferramentas de corte.

As operações de *hard milling* apresentam benefícios que foram descritos por diversos autores (Astakhov [2011], Elbestawi et al. [1997], Gaitonde et al. [2016]). Os principais benefícios desta operação são:

- Fácil de adaptar a peças com contornos complexos;
- Rápida mudança entre os tipos de componentes;
- Várias operações são realizadas num só *set-up*;
- Elevadas taxas de remoção de material;
- Eliminação do fluido de corte, na maior parte dos casos;
- Obtenção de melhor acabamento superficial;
- Redução dos tempos e custos na produção.

Contudo, esta operação apresenta algumas limitações, tais como (Astakhov [2011]):

- O custo de uma ferramenta é significativamente mais elevado para *hard machining* do que para o processo de retificação;
- Para o sucesso de uma boa maquinagem, em materiais duros, é necessário que o porta-ferramenta, o cone de fixação e a máquina-ferramenta apresentem rigidez, pois o grau de rigidez é o grau de precisão de uma operação de *hard milling*;
- Para cortes interrompidos, o melhor é a maquinagem a seco. Maquinar a seco providencia custos benéficos, contudo provoca distorções térmicas, manipulações e empenos na peça, que significam problemas;
- O acabamento da superfície da peça a maquinar piora com o desgaste da ferramenta, mesmo estando dentro do limite de vida desta;

Recentemente, a tecnologia de *hard milling* tem ajudado muitos fabricantes a eliminar o processo de eletro-erosão (EDM) e a conseguir atingir tempos mais vantajosos na produção de moldes e punções. O *hard milling* pode ser visto como um processo complementar do EDM na produção destes. Trata-se de um processo de uma só etapa, sendo capaz de produzir peças complexas. Contudo, não substitui o EDM completamente, onde é necessário para realizar operações onde existam cantos internos e estrias profundas.

A chave para um bom processo de *hard milling*, é a capacidade de incorporar corretamente a máquina-ferramenta, a ferramenta e o programa. Atualmente, a maquinagem de materiais endurecidos é realizada através de maquinagem a alta velocidade, comumente designada por *High Speed Machining*. Definições de *hard milling* variam de autor

para autor e de aplicação para aplicação. De forma consensual o *hard milling* pode ser definido como a maquinação de materiais com durezas compreendidas entre 45-64 HRC utilizando velocidades de rotação da árvore superiores a 10000 rpm. A profundidade de corte é normalmente 0.2 mm ou menos em ambas as direções radiais e axiais (Grzesik [2008]).

## 2.2 Materiais para Ferramentas de Corte de Materiais Endurecidos

Para uma seleção correta da ferramenta e pós-produção de uma peça em material endurecido, esta têm de apresentar um substrato estável, tanto quimicamente, como fisicamente a elevadas temperaturas. A dureza e a rigidez devem ser mantidas para evitar fraturas, especialmente em operações de fresagem onde o corte é interrompido, (López de Lacalle et al. [2011]).

O material ideal para a ferramenta de corte deve conjugar todas as características necessárias (dureza, resistência do material e ao desgaste) (Figura 2.1). Deve-se selecionar as mais adequadas à aplicação em causa, e no presente projeto curricular pretende-se uma ferramenta com elevada resistência ao desgaste e elevada dureza para suportar materiais endurecidos, a elevadas velocidades de corte e pequenos avanços.

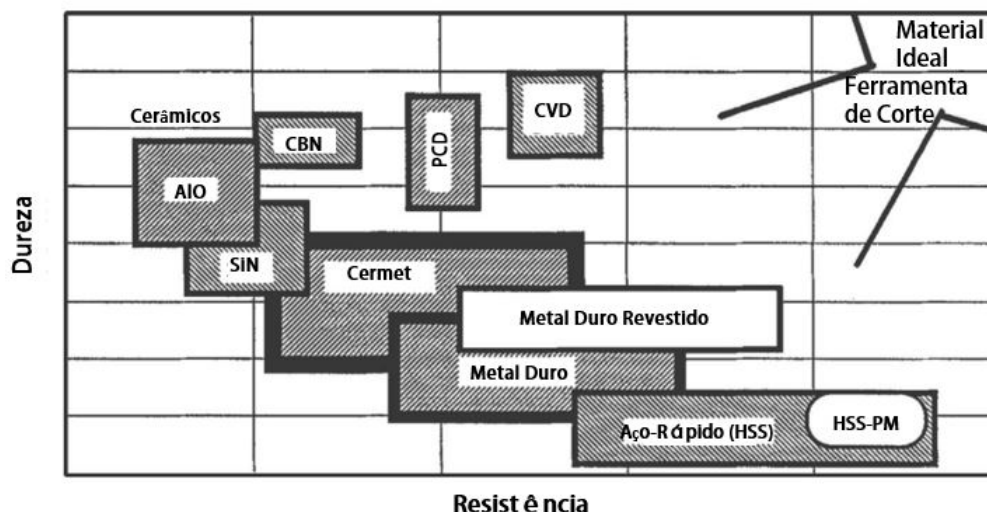


Figura 2.1: Comparação relativa da resistência ao desgaste abrasivo dos materiais da ferramenta. (Stephenson and Agapiou [2016]) (adapt.)

No processo de *hard machining* aplicado a aços endurecidos, são geralmente utilizadas ferramentas de corte de metal duro ou carboneto sinterizado, cerâmicos, de cermet, de nitreto de boro cúbico (CBN) e de diamante policristalino (PCD). No presente projeto curricular foram utilizadas pastilhas de metal duro, daí se tornar relevante dar algum ênfase a este material.

### 2.2.1 Metal Duro

As ferramentas de metal duro são capazes de atingir diferentes combinações de dureza a frio e a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, variando a sua composição química, (Davim [2008]). O metal duro é obtido através do processo de pulverometalurgia, onde os seus constituintes são misturados na forma de pós e submetidos utilizando um processo de compactação em prensas apropriadas. São sinterizados em fornos com atmosfera controlada e posteriormente são ou não sujeitos a operações mecânicas tais como retificação, dando origem a um produto de elevada densidade.

O metal duro é formado por um carboneto muito duro e por um ligante. O carboneto muito duro é de elevada resistência ao desgaste, geralmente é o carboneto de tungstênio (WC), e pode apresentar-se só ou associado com outros carbonetos. São estes que garantem a dureza a quente e a resistência ao desgaste. O elemento ligante, normalmente o cobalto (Co), tem como função ligar os carbonetos e é o responsável pela tenacidade do material. Os carbonetos sinterizados podem ser revestidos, ou seja, no substrato, à base de carboneto de tungstênio e cobalto, é colocado um revestimento muito resistente ao desgaste, são exemplos o nitreto de titânio (TiN), o nitreto de titânio de alumínio (TiAlN), entre outros, (Davim and Correia [2006]).

A utilização de ferramentas de metal duro permitem obter uma taxa de remoção de material superior às obtidas com outros materiais, promovem um melhor acabamento superficial, menores tempos de produção por peça, no geral, maior vida útil da ferramenta (entre 3 a 15 vezes) com menores custos de substituição ou afiamento de ferramentas, (Davim [2008]).

O tamanho do grão do carboneto de tungstênio (WC) afeta a dureza, a tenacidade da ferramenta e a aresta de corte. Grãos finos de WC geram secções finas de elemento aglomerante (Co), resultando em materiais mais duros, mas com menor resistência à fratura. A dureza aumenta com a diminuição do tamanho do grão, sem que o teor de cobalto seja alterado. Por isso os microgrãos de carboneto exibem maior resistência ao desgaste em operações de semi-desbaste e acabamento. As classes de microgrão são classificadas como: grão fino ( $< 1.3\mu m$ ), sub-microgrão ( $< 0.8\mu m$ ), grão ultra-fino ( $< 0.5\mu m$ ) e nano-grão ( $< 0.2\mu m$ ), (Stephenson and Agapiou [2016]).

## 2.3 Processos de Revestimentos

No caso das ferramentas de corte, consideram-se dois processos principais para aplicação de revestimentos: deposição física em fase de vapor (PVD) e deposição química em fase de vapor (CVD) (Figura 2.2). Para o presente projeto curricular, as pastilhas foram revestidas através do processo de PVD e é de evidenciar que este é o processo que mais ênfase vai ter.

As técnicas de deposição classificadas como PVD são, nas diversas variantes, a pulverização catódica e a evaporação. A importância destas técnicas na produção de revestimentos tem vindo a acentuar-se nos últimos anos e em ambas as técnicas, a deposição de revestimentos compreende basicamente três fases: (Cavaleiro and Vieira [1995])

- Transformação do material a depositar para a fase gasosa;
- Transporte do vapor, entre a fonte e o substrato;

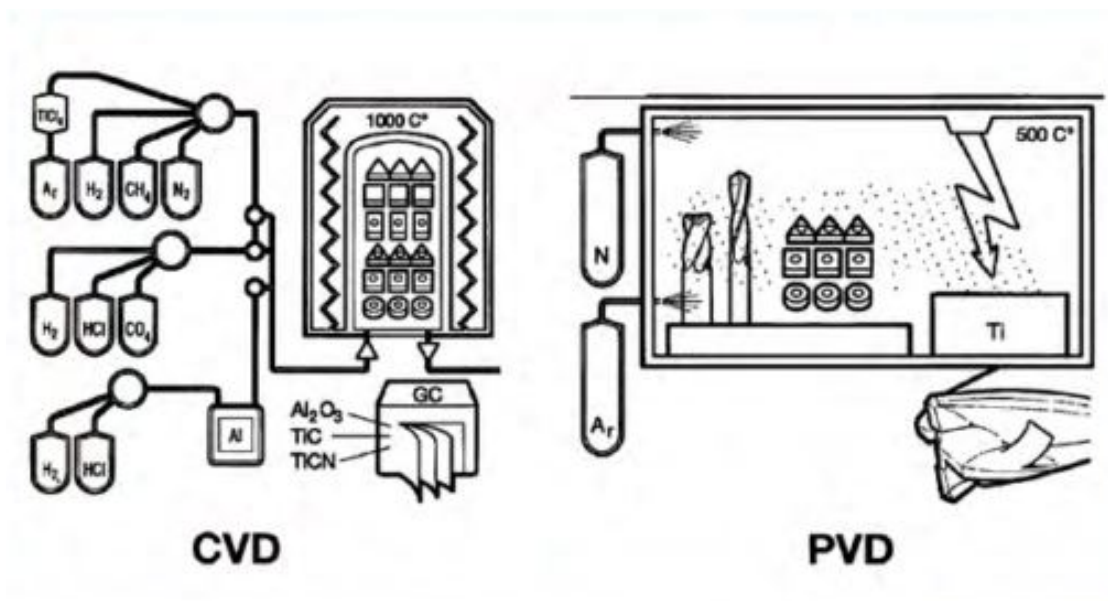


Figura 2.2: Representação esquemática dos processos CVD e PVD. (Smith [2008])

- Condensação do vapor à superfície do substrato e respectiva formação de revestimento.

O processo de deposição física em fase de vapor, é caracterizado por revestimentos cerâmicos normalmente aplicados em camadas de espessura de  $1\text{-}15\mu\text{m}$  em ferramentas de metal duro ou aço. Este processo foi desenvolvido em 1970 para verificar a capacidade dos materiais cerâmicos aguentarem elevadas temperaturas nos substratos, ao contrário dos de metal duro (López de Lacalle et al. [2011]).

De acordo com Fernández-Abia et al. [2013], o processo de PVD tem tido um enorme sucesso, por ser feito em temperaturas mais baixas ( $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ ) que o processo CVD ( $900\text{-}1000^{\circ}\text{C}$ ). A espessura, as propriedades térmicas, as tensões residuais e o grão de adesão são bastante diferentes entre o CVD e o PVD. O PVD garante resistência ao desgaste devido à sua dureza, é caracterizado pelas suas tensões compressivas que certificam a tenacidade na aresta de corte e melhoram a confiança na ferramenta. Este processo é recomendado quando a dureza e a aresta de corte é refinada, além disso o uso de carboneto de tungstênio num processo PVD, com um tamanho de grão muito fino, melhora resistência da aresta de corte. O revestimento em CVD é caracterizado por tensões residuais e fissuras causadas pelo aquecimento, devido à grande diferença entre os coeficientes de expansão térmica, logo este não garante facilidade de interação com o substrato. Consequentemente as ferramentas com revestimentos CVD são mais suscetíveis a atingir uma aresta mais robusta do que com o revestimento PVD. Contudo o revestimento PVD é uma mais valia económica.

## 2.4 Revestimentos para Ferramentas de Corte

O revestimento de uma ferramenta de corte é feito através de deposição de uma ou várias finas camadas de elementos com espessuras que variam normalmente entre os 2 a 15  $\mu m$ . Os revestimentos garantem uma dureza e condição química estável para proteger a ferramenta. (López de Lacalle et al. [2011])

De acordo com Stephenson and Agapiou [2016], o TiN, TiCN, TiAlN e AlTiN (maior teor de Al que o TiAlN) são os revestimentos mais comuns utilizados em ferramentas rotativas e maioritariamente aplicam-se utilizando o processo PVD. O bom desempenho destes revestimentos dependem do material a maquinar, do tipo de operação, da geometria da ferramenta e das condições de corte. Os revestimentos utilizados neste projeto foram: o AlTiN, o TiAlN e o TiN.

O TiAlN apresenta uma ductilidade superior e demonstra ser mais estável a temperaturas elevadas do que o TiN e o TiCN. Pode ser aplicado em camadas mais espessas para compensar e proporcionar maior vida útil da ferramenta. Este garante alta resistência à oxidação, alta condutividade térmica, maior dureza a quente e a frio. O desempenho deste é alterado pela alteração do conteúdo de alumínio, para se adequar as aplicações específicas. Por exemplo, os revestimentos de AlTiN são destinados a maquinar materiais duros ou abrasivos. O TiN reduz o atrito e resiste ao desgaste do adesivo e à deformação da aresta, bem como ao aumento da resistência à oxidação, atua como uma barreira química a materiais ferrosos. (Smith [2008])

## 2.5 Geometria da Ferramenta

Para a seleção correta de uma ferramenta de corte para fresagem é necessário selecionar corretamente os seguintes fatores: a geometria da aresta de corte (ângulo de ataque ( $\gamma$ ) e de posição da aresta de corte( $\kappa_r$ )), o diâmetro desta, os ângulos de entrada e saída e a construção da ferramenta (integral ou de pastilhas indexáveis). (Stephenson and Agapiou [2016])

Para definir geometricamente uma ferramenta de corte rotativa são tidos em conta os seguintes ângulos: o ângulo de posição ( $\kappa_r$ ), o ângulo de inclinação ( $\lambda$ ), o ângulo de ataque efetivo de corte ( $\gamma_e$ ) e o ângulo de ataque radial ( $\gamma_{radial}$ ) e axial ( $\gamma_{axial}$ ).

O ângulo de inclinação ( $\lambda$ ) influencia a maneira como a aparta é direcionada e desempenha um papel importante, principalmente em operações onde a profundidade de corte tem valores consideráveis. Note-se que nestes casos a aparta, sendo de maior dimensão, necessita de ser evacuada de forma eficiente da zona de corte. Se o ângulo de inclinação for positivo, é garantido um menor impacto quando a aresta de corte entra em contacto com o material a maquinar.

O ângulo efetivo de corte influencia as forças de corte tangenciais e a exigência de potência. Um ângulo efetivo de corte positivo, significa menos potência. Por cada aumento de grau positivo, aproximadamente 1,5% de potência não é necessária. Este ângulo é resultado do ângulo axial, radial e do ângulo de ataque da pastilha.

Os ângulos radial e axial definem o tipo de ferramenta e são várias combinações destes ângulos com o ângulo de posição da aresta que determinam qual a função que a ferramenta vai ter. (Coromant [1996]) De acordo com a literatura, existem três geometrias possíveis para os ângulos de ataque radial e axial: (Coromant [1996], Stephenson and Agapiou [2016], ToolingU [2008])



- **Duplamente Positivos:** ambos os ângulos são positivos. Esta geometria garante: mais facilidade de corte que a geometria duplamente negativa, a espessura da apara e da superfície de contacto são reduzidas, as forças de corte são menores, o que providencia o uso de menor potência. Esta geometria provoca menor deflexão e esforço da máquina-ferramenta. A maior desvantagem é a fragilidade da aresta de corte.

Esta combinação de ângulos é indicada para operações fáceis de maquinar, maquinagem de materiais não ferrosos, tais como ligas de alumínio, materiais que formam apara contínua, materiais endurecidos e aços inoxidáveis macios.

- **Duplamente Negativos:** ambos os ângulos são negativos. Este tipo de geometria acarreta vantagens: é económico, visto que os dois lados da pastilha podem ser usadas, oferecendo mais rigidez às arestas de corte, pois permite a utilização de materiais mais resistentes ao desgaste nas pastilhas.

Contudo esta geometria implica grande exigência na potência e da estabilidade da máquina-ferramenta, devido às elevadas forças de corte. Forma aparas de grande espessura devido à grande superfície de contacto da aresta e, quando maquinar materiais de apara longa muitas vezes leva à formação de uma apara extensiva e desvantajosa. São indicadas para desbaste e acabamento de aços temperados e ferros fundidos, incluindo graus duros e de alta resistência.

- **Negativa/Positiva:** o ângulo de ataque axial é positivo e o ângulo de ataque radial é negativo. Este tipo de geometria combina algumas vantagens de ambos os ângulos de ataque positivos e negativos. Permite maquinar elevados avanços por dente e grandes profundidades de corte, sendo fácil de atingir porque, um ângulo de ataque radial negativo providencia uma pastilha com elevada rigidez, e um ângulo de ataque axial providência uma boa formação de apara direccionando a mesma para fora da ferramenta. São indicadas para desbaste e acabamento de alumínio mais duros e outros materiais não ferrosos. Esta configuração é capaz de lidar com condições e materiais difíceis de maquinar.

Na Figura 2.3 demonstra as diferentes configurações para os ângulos de ataque radial e axial. A Figura 2.4 representa as aparas formadas pelas diferentes configurações.

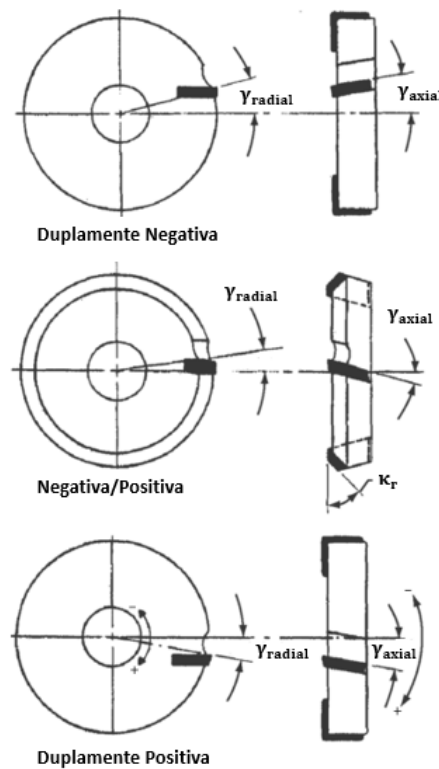


Figura 2.3: Três diferentes combinações dos ângulos de ataque, radial e axial. (Stephenson and Agapiou [2016]) (adapt.)

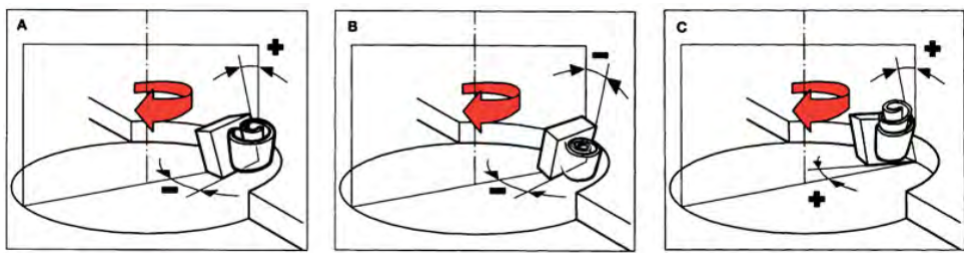


Figura 2.4: Formação da apra nas três diferentes combinações dos ângulos de ataque, radial e axial. A- Negativa/Positiva; B- Duplamente Negativa; C- Duplamente Positiva. (Smith [2008])

Para maquinagens onde a operação é de acabamento, são utilizadas pastilhas com um ângulo de posição de aresta de  $90^\circ$ . Na Figura 2.5 está representada uma das pastilhas disponibilizadas pela *Palbit*, que apresenta uma combinação negativa/positiva e demonstra todos os ângulos necessários para avaliar a geometria desta e que anteriormente foram falados.

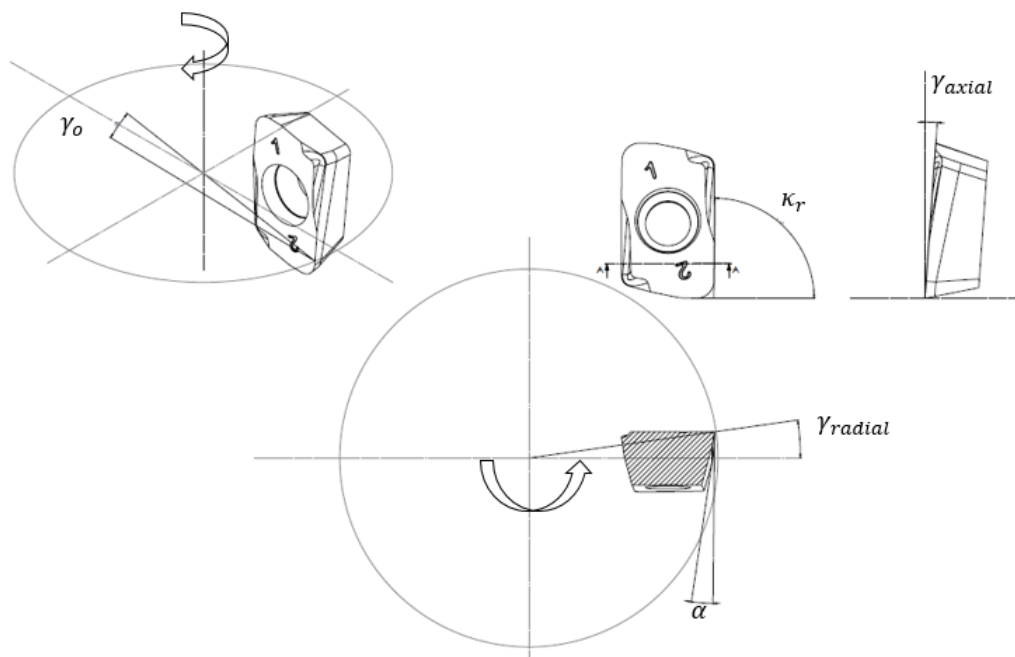


Figura 2.5: Representação de todos os ângulo necessários numa combinação negativa/positiva.

### 2.5.1 Preparação da Aresta de Corte

A forma e as condições da aresta de corte são cruciais para as operações de maquinagem. Durante o processo de corte, o elevado impacto térmico e mecânico na aresta de corte resulta num desgaste elevado. Além disso, é a forma da aresta de corte que qualifica a qualidade da superfície maquinada. (Denkena and Biermann [2014])

A micro-geometria da aresta de corte tem uma grande influência na força de corte, na integridade da superfície da peça (rugosidade e tensões residuais) e nas temperaturas desenvolvidas num processo de maquinagem. Logo, o objetivo da preparação da aresta de corte é: aumentar a resistência da aresta, aumentar o tempo de vida útil da ferramenta, reduzir as tensões internas do revestimento, reduzir o risco de lascamento da aresta de corte e definir a forma e tamanho da aresta e corte. (Fulemova and Janda [2014], Oliveira [2007])

Uma adequada preparação da aresta de corte é de grande importância no desempenho da ferramenta, principalmente as que são constituídas por materiais frágeis como cermets, cerâmicos e PCBN, pois aumenta a resistência e protege a aresta de possíveis lascamentos e quebras. Portanto, deve ter-se em conta a preparação da aresta de corte, pois esta contribui para uma melhor maquinagem. (Stephenson and Agapiou [2016])

Conforme ilustrado na Figura 2.6, existem três tipos de preparação da aresta (esta preparação é feita antes da deposição do revestimento): utilização de um raio, chanfro ou chanfro e raio.



Figura 2.6: Diferentes tipos de preparação da aresta. 1. Sem preparação, 2. Raio de ponta, 3. Chanfro e 4. Raio de ponta e chanfro. (Oliveira [2007]) (adapt.)

Fulemova and Janda [2014] investigaram os efeitos da preparação da aresta de corte e a variação do raio de ponta na vida útil da ferramenta e nas forças de corte durante uma operação de acabamento, no aço X12CrMoVNbN9-1. Utilizaram ferramentas de corte com os seguintes raios de ponta, 5, 10 e 15  $\mu\text{m}$  e uma profundidade de corte de 0.02 mm. O gráfico representado na Figura 2.7a demonstra a influência do raio de ponta na vida útil da ferramenta. É possível concluir que a vida útil da ferramenta aumenta com o aumento do raio de ponta. Mediram também o desgaste da ferramenta, este foi feito na face de folga (pois o desgaste criado nesta face influencia a rugosidade da superfície maquinada). O valor definido pelo autor para a rugosidade máxima obtida foi de 0,8  $\mu\text{m}$ . A influência do raio de ponta na superfície maquinada pode ser visto no gráfico da Figura 2.7b. Concluiu-se então que a ferramenta com um raio de ponta de 15  $\mu\text{m}$  atingiu a maior vida útil da ferramenta, o menor valor de rugosidade na superfície maquinada e ainda é a que apresenta as forças de corte menores, comparada com as outras ferramentas.

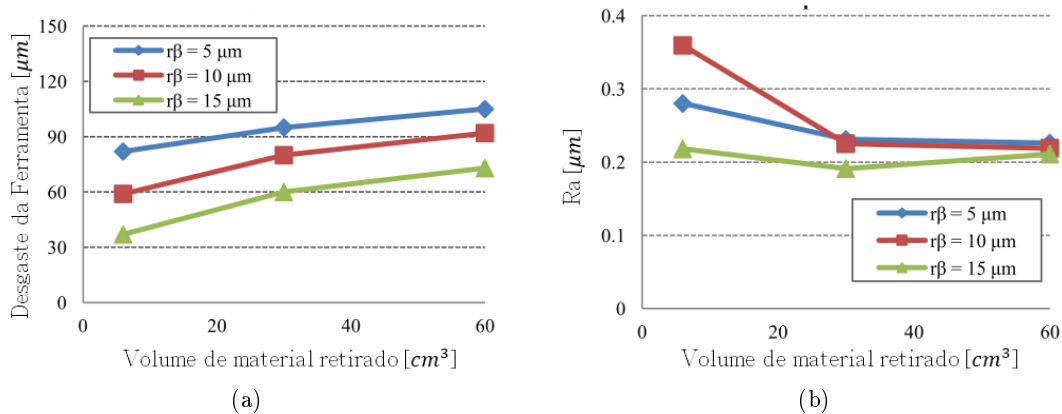


Figura 2.7: Influência do raio de ponta na vida útil da ferramenta e na rugosidade da superfície maquinada. Fulemova and Janda [2014] (adapt.)

## 2.6 Desgaste e Vida das Ferramentas de Corte

A otimização das operações de maquinagem dependem da eficiência das ferramentas de corte, que por sua vez dependem da escolha apropriada do material que a constitui, da sua geometria e dos parâmetros de corte selecionadas. Geralmente, os mecanismos

responsáveis pelo desgaste quer na face de saída, quer na face de ataque, são: a abrasão, a difusão, a adesão e a oxidação. Os processos de desgaste abrasivo e adesivo são os mais significativos na maquinação a baixas velocidades de corte, normalmente usadas na maquinação de aços temperados. (Stephenson and Agapiou [2016])

Nos processos de *hard machining*, o aumento da temperatura causado pelo aumento da velocidade de corte, tende a acelerar a ocorrência de outros fenómenos de desgaste entre a peça, a ferramenta e a apra, tais como a difusão e a oxidação. (Deonísio [2004])

Estes mecanismos de desgaste estão sumarizados na Figura 2.8.

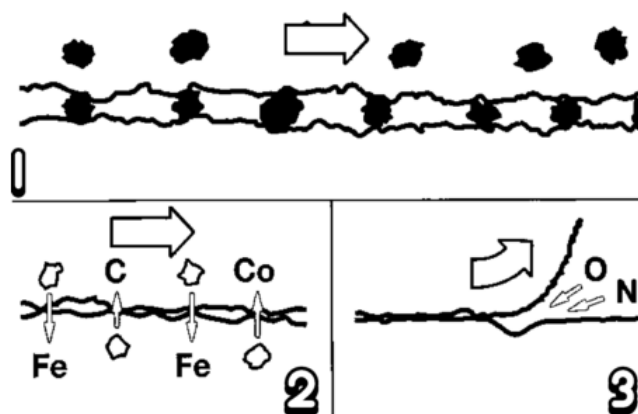


Figura 2.8: Representação esquemática dos tipos de mecanismos referidos anteriormente. 1) Abrasão, 2) Difusão e 3) Oxidação (Sandvik Coromant [1994]) (adapt.)

### 2.6.1 Desgaste da Ferramenta na Fresagem

Os principais padrões de desgaste verificados em ferramentas de corte durante operações de fresagem estão representados na Figura 2.9. Estes encontram-se definidos na norma ISO 8668-1 [1989].

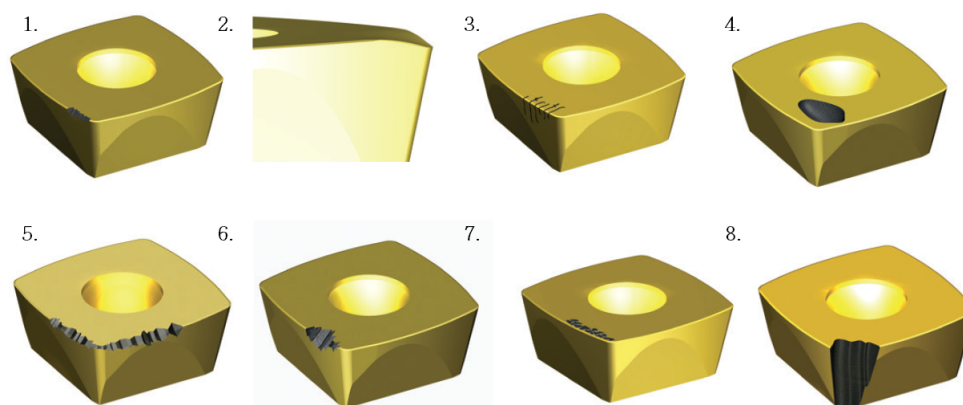


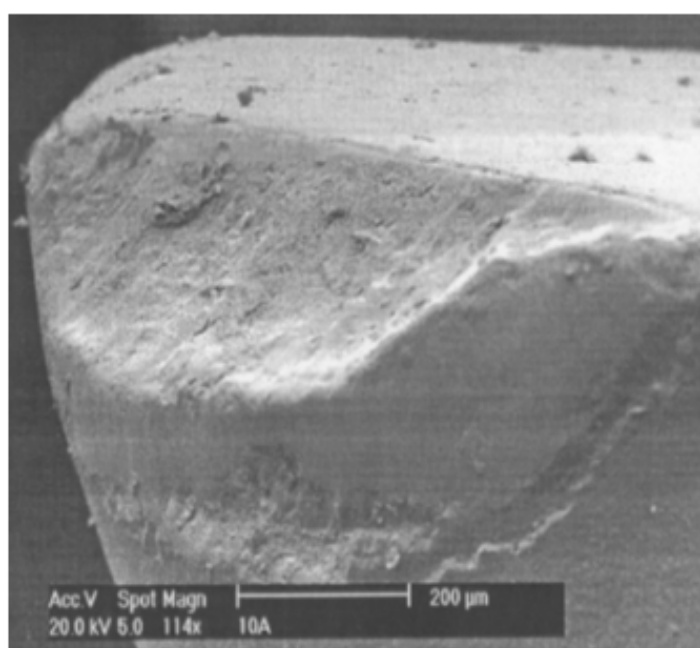
Figura 2.9: Formas típicas de degradação das ferramentas de corte. 1. Desgaste da aresta, 2. Deformação da aresta, 3. Fendas Térmicas, 4. Cratera na face de ataque, 5. Esmilhamento, 6. Fractura, 7. Aresta postíça de corte, 8. Fractura catastrófica. (Palbit [2017a])

De acordo com López de Lacalle et al. [2011], os desgastes mais típicos na ferramenta de corte durante o processo de *hard milling* são: o desgaste de flanco (VB), o desgaste de cratera (KT), o lascamento ou *chipping* (CH), a fragmentação (FL) e a falha catastrófica (CF).

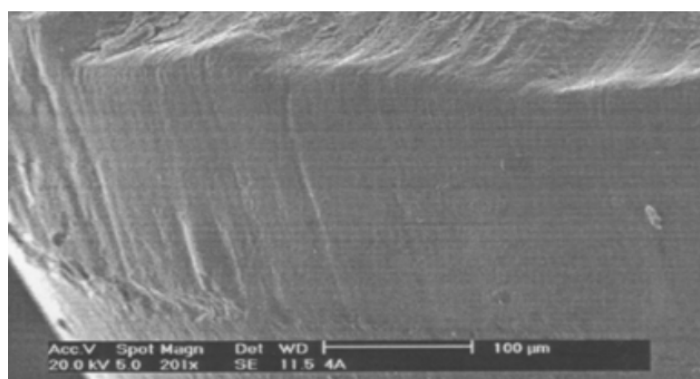
- **Desgaste de flanco (VB):** é a perda de partículas ao longo da aresta de corte, ou seja, na intersecção da face de folga com a face de ataque. Existem três tipos de desgaste de flanco possíveis:
  - **Desgaste de flanco uniforme (VB1):** desgaste na ferramenta ao longo da profundidade axial de corte;
  - **Desgaste de flanco não uniforme (VB2):** representa um desgaste irregular em diversas zonas da aresta de corte;
  - **Desgaste de flanco localizado (VB3):** desgaste provocado em pontos específicos, típico em materiais suscetíveis a endurecimento mecânico.
- **Desgaste de cratera ou desgaste na face de ataque (KT):** é um desgaste que toma em consideração a profundidade máxima da cratera e está localizado na face de ataque da ferramenta. O desgaste mais típico é o desgaste de cratera (KT1) e trata-se de um desenvolvimento progressivo de uma cratera orientada paralelamente à aresta de corte;
- **Lascamento (CH):** é a fragmentação irregular da aresta de corte em pontos aleatórios, sendo muito difícil de medir e prevenir. Este consiste em proporções pequenas da ferramenta que se separam da aresta de corte, devido ao impacto mecânico e às tensões térmicas transientes que ocorrem como consequência do aquecimento e arrefecimento cíclico. Existem dois tipos de desgaste de lascamento:
  - **Lascamento uniforme (CH1):** são pequenas quebras na aresta de corte, aproximadamente do mesmo tamanho da área em contacto com o material a maquinar;
  - **Lascamento não uniforme (CH2):** é um desgaste provocado aleatoriamente em alguns pontos da aresta de corte, mas sem consistência de uma aresta para a outra.
- **Fragmentação (FL):** é a perda de fragmentos da ferramenta;
- **Falha catastrófica (CF):** é a degradação rápida da ferramenta e posteriormente a sua quebra.

Kundor et al. [2016] realizaram ensaios de fresagem no aço AISI D2 com uma dureza de 62 HRc utilizando ferramentas de metal duro revestidas com TiN, TiCN e  $Al_2O_3$  por processo de CVD. Os ensaios foram realizados com os seguintes parâmetros de corte: 50 m/min, 65 m/min, 72 m/min, 80 m/min e 95 m/min para as velocidades de corte e com avanços por dente de 0.02 e 0.04 mm/dente. Estabeleceu um  $VB_{max}$  de 0.7 mm e um VB de 0.3 mm. Estes demonstraram que o desgaste tomou lugar na face de ataque e alguma aderência e fragmentação foi criada (Figura 2.10a). Com uma velocidade de corte de 95 m/min e um avanço de 0.04 mm/dente, ocorreu desgaste por difusão e dissolução,

devido às elevadas temperaturas entre a ferramenta e o material a maquinar. A fusão do material a maquinar com a face de ataque é o fenómeno que conduz à difusão (Figura 2.10b). A uma velocidade de corte de 80 m/min e um avanço de 0.02 mm/dente, o desgaste ocorrido pode ser atribuído à temperatura devido à elevada velocidade, bem como à abrasão (Figura 2.11a). Com 50 m/min de velocidade de corte e 0.04 mm/dente de avanço, o desgaste teve origem em reações químicas e de adesão entre a ferramenta e o material a maquinar (Figura 2.11b).

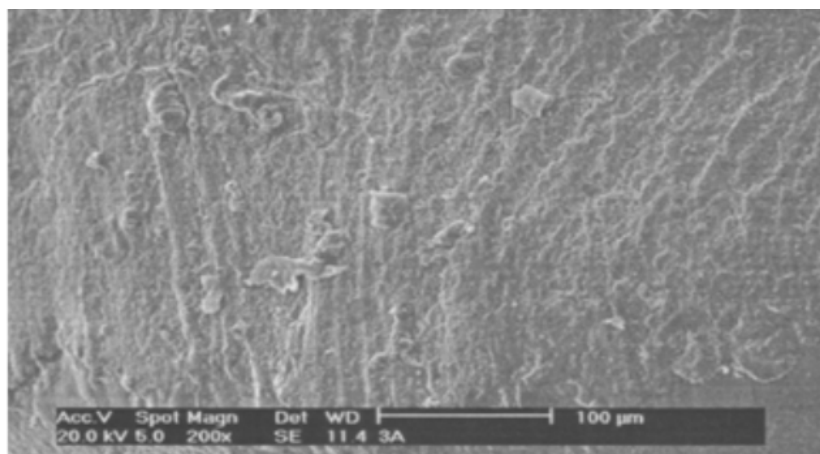


(a) Fragmentação da aresta de corte.

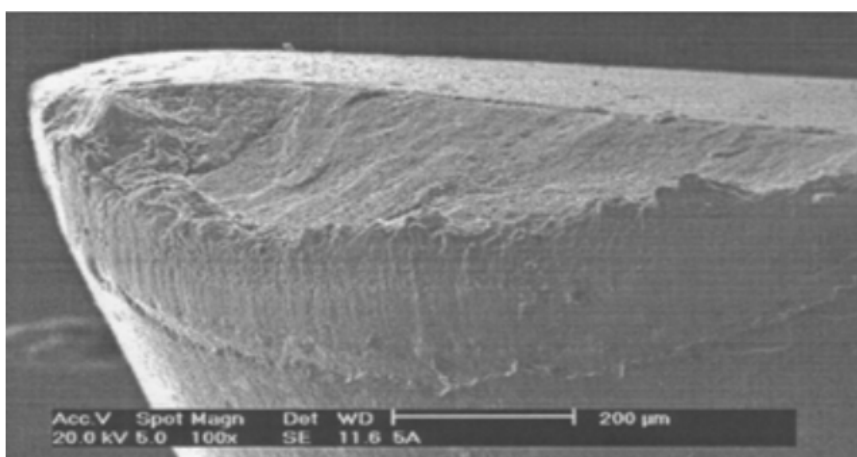


(b) Desgaste suave causado por difusão.

Figura 2.10: Tipos de desgates identificados por Kundor et al. [2016] a uma velocidade de corte de 95 m/min e um avanço de 0.04 mm/dente.



(a) Desgaste abrasivo na face de ataque.

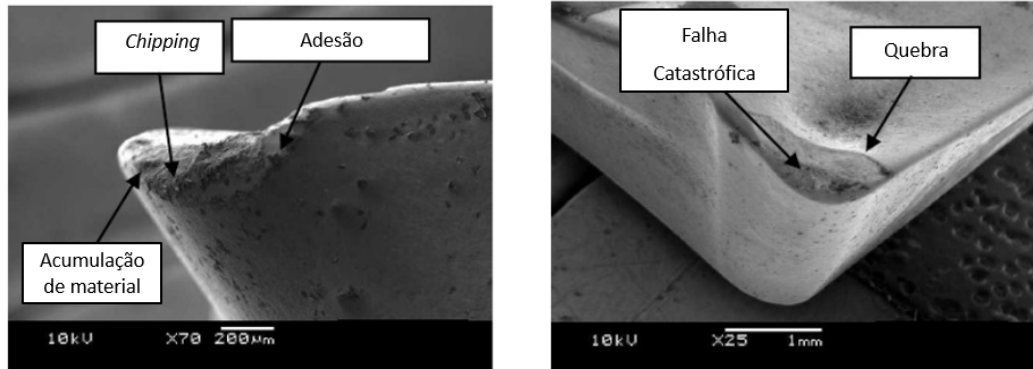


(b) Desgaste excessivo devido à adesão.

Figura 2.11: Tipos de desgates identificados por Kundor et al. [2016] a velocidades de corte de 80 e 50 m/min e avanços de 0.02 e 0.04 mm/dente respectivamente.

Jasni et al. [2012] realizaram ensaios de fresagem a seco no aço AISI D2 de dureza compreendida entre os 58 e 62 HRc, utilizando ferramentas de corte de metal dura revestidas com TiAlN e AlCrN. Este ensaios foram realizados para avaliar os desgastes típicos com vários parâmetros de corte. O desgaste de flanco, o lascamento e a fratura catastrófica foram os desgastes predominantes da ferramenta. Os mecanismos de desgaste mais observados foram a adesão e a abrasividade. Estes demonstraram que a ferramenta apresentou um desgaste lento até atingir o critério de vida pretendido de 0.3 mm. Consequentemente o material foi-se acumulando na face de ataque da ferramenta o que aumentou o desgaste, causando adesão e formação de *chipping* (Figura 2.12a). Aumentando a velocidade e a profundidade de corte, provocou um aumento de temperatura na ferramenta, levando esta a quebrar e a apresentar um desgaste do tipo falha catastrófica (Figura 2.12b).





(a) Formação de adesão e *chipping* e acumulação de material.

(b) Falha catastrófica da ferramenta.

Figura 2.12: Ensaios realizados por Jasni et al. [2012] para análise de desgaste típicos a diferentes parâmetros de corte.

### 2.6.2 Tempo de Vida da Ferramenta

A vida útil de uma ferramenta de corte é o tempo de corte efetivo das arestas de corte em trabalho, antes que seja necessário afiar a ferramenta ou substituir as pastilhas. Existem vários critérios possíveis para quantificar a vida de uma ferramenta de corte. O critério de vida normalizado pela ISO 8668-1 [1989] para um teste de vida de curta duração, para um desgaste uniforme da face de saída, tem como valor de referência  $VB=0,2\text{mm}$ .

A Tabela 2.1 também auxiliou na escolha do critério de vida da ferramenta de corte, sendo que o material utilizado nas ferramentas é metal duro revestido (carbonetos revestidos), numa operação de acabamento, apresentando um limite entre 0.1-0.25 para o valor de VB.

Tabela 2.1: Valores limites de desgaste recomendáveis na prática para diferentes materiais de ferramenta. (Astakhov and Davim [2008]) (adapt.)

Material da Ferramenta		Aços Rápidos	Carbonetos	Carbonetos Revestidos	Cerâmicos	
Operação	(mm)				$Al_2O_3$	$Si_3N_4$
Acabamento	$VB_{max}$	0.2-0.3	0.1-0.25	0.1-0.25	0.1-0.2	0.1-0.2

Definido o critério de vida, é possível obter a curva de desgaste. Esta curva tem como variáveis o tempo de corte ( $t_c$ ) e o valor de desgaste, por exemplo o VB. A curva de vida de uma ferramenta é dada por:

$$V_c \times T^n = C \quad (2.1)$$

A expressão anterior define a Lei de Taylor. Apresenta também expressões equivalentes como:

$$T = K \times V_c^{-x} \quad (2.2)$$

ou

$$T \times V_c^x = K \quad (2.3)$$

onde o T é a vida da ferramenta em minutos,  $V_c$  é a velocidade de corte em (m/min), o x e o K são coeficientes determinados a partir da curva de vida. Na Tabela 2.2 encontram-se alguns valores da constante n observados na prática por alguns autores.

Tabela 2.2: Valores de n observados na utilização de diferentes materiais de ferramenta. (Astakhov and Davim [2008])

Material da Ferramenta	Aços Rápidos	Carbonetos Revestidos	Cerâmicos
n	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5-0.7

Uma análise da expressão da Lei de Taylor, indica como fatores que influenciam a vida da ferramenta: a velocidade de corte, o coeficiente x e a constante K. Estes não são variáveis tecnológicas, são coeficientes da reta. Os seus valores são influenciados não só pelo critério de vida adotado, mas também pelas condições de elaboração das curvas de desgaste, ou seja: o material da peça, da ferramenta, a geometria da ferramenta, as condições de corte e a utilização ou não de fluido de corte, (Davim [2008]).

Diversas pesquisas (Aslan [2005], Bosheh and Mativenga [2006], Fallböhmer et al. [2000] e Koshy et al. [2002]) têm sido efetuadas de forma a avaliar desgaste e tempo de vida das ferramentas de corte. No entanto, os estudos realizados em materiais endurecidos (mais concretamente em *hard milling*) incidem sobretudo na utilização de ferramentas de metal duro, revestidas ou não, cerâmicos, PCBN, entre outras.

De acordo com Bosheh and Mativenga [2006] que realizaram ensaios no aço AISI H13 de dureza 54-56 HRC, concluíram que o desgaste na face de saída aumentava com a velocidade de corte, e um aumento da velocidade de corte faz com que a vida útil da ferramenta diminua. O aumento do desgaste na face de saída deve-se ao aumento da temperatura na aresta de corte, assim como a formação de crateras, à medida que a velocidade de corte aumenta.

Aslan [2005] realizou um ensaio experimental onde maquinou um aço X210 Cr12 com uma dureza de 62 HRC, utilizando as seguintes ferramentas: uma de metal duro revestida com TiCN por PVD, outra de metal duro revestida com TiCN+TiAlN por CVD, uma ferramenta de cermet revestida com TiAlN por PVD, uma ferramenta de cerâmica revestida com  $Al_2O_3$ +TiCN e por fim uma ferramenta de CBN. O teste realizado teve como objetivo avaliar o desempenho das ferramentas baseando-se no desgaste desta e na superfície maquinada. O Autor realizou um estudo onde determinou o desgaste de flanco ao fim de remover  $1200 \text{ mm}^3$ , como demonstra a Figura 2.13. Concluiu que as ferramentas de metal duro e de cermet, a velocidades de corte menores, exibiram tempos de vida útil menores que as ferramentas cerâmicas e de CBN. Avaliou o desgaste em cratera criado nas ferramentas de CBN, causado pelas elevadas temperaturas na face de ataque. Elevadas velocidades de corte geram elevadas temperaturas na aresta de corte, o que aumenta o desgaste abrasivo.

Fallböhmer et al. [2000], realizaram um ensaio de fresagem no aço AISI D2 (59 HRC), utilizando ferramentas de PCBN e de metal duro revestido com TiN. Este concluiu que, antes de o desgaste de flanco ter atingido um valor de  $100 \mu\text{m}$ , o fim da vida útil da ferramenta foi caracterizado pelo lascamento da aresta de corte. Foi maquinado um

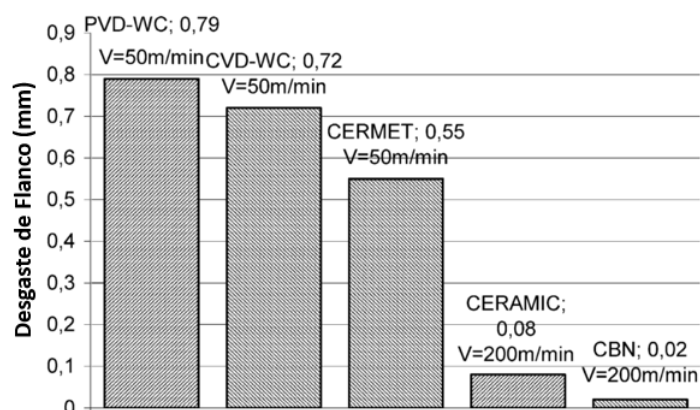


Figura 2.13: Medição do desgaste após remoção de  $1200 \text{ mm}^3$  de material. (Aslan [2005]) (adapt.)

máximo de  $90 \text{ cm}^2$  de material a uma velocidade de 150 m/min. À velocidade de corte de 60 m/min a vida da ferramenta de PCBN foi duas vezes maior que a de metal duro, como demonstra a Figura 2.14. Foi ainda possível concluir que a velocidades de corte acima de 550 m/min não é possível realizar ensaios praticáveis, devido às elevadas tensões geradas. Recomendou a diminuição da profundidade de corte e do avanço por dente.

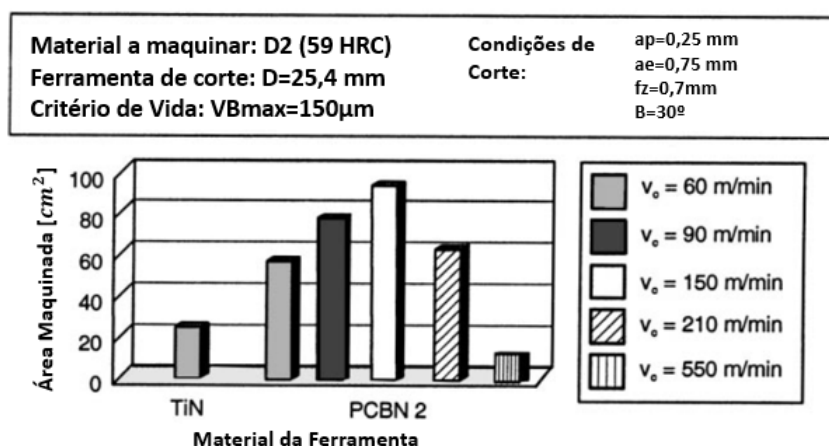


Figura 2.14: *Performance* de diferentes materiais de corte na fresagem a altas velocidades do aço D2. (Fallböhmer et al. [2000])

Koshy et al. [2002], realizaram um ensaio de fresagem no aço AISI D2 ( $\sim 58 \text{ HRC}$ ) utilizando pastilhas indexáveis acopladas em ferramentas de metal duro e cermet. Compararam o seu estudo com ensaios realizados no aço AISI H13 ( $\sim 52 \text{ HRC}$ ) nomeadamente, os mecanismos de desgaste e a vida das ferramentas. Numa breve análise aos padrões de desgaste de flanco, demonstrou que o lascamento, a adesão e o atrito eram os mecanismos responsáveis pelo desgaste. Os autores afirmaram ainda que isso se deve ao efeito combinado da dureza do material a maquinar e da composição/micro-estrutura química

adversas do material.

## 2.7 Integridade Superficial

A integridade de uma superfície é definida como a condição inerente ou melhorada de uma superfície produzida numa maquinagem. Esta é quantificada pelo estado mecânico, metalúrgico, químico e topológico da superfície. (Jang et al. [1996])

Um bom desempenho da maquinagem será demonstrado quando a integridade da superfície é maior. Assim, o controlo da integridade da superfície tem uma importância considerável nos processos de fabrico. A rugosidade da superfície, as tensões residuais e a formação da camada branca são partes da integridade superficial que dependem dos parâmetros de maquinagem e da habilidade de corte da aresta da ferramenta, isto é, do desgaste e das condições de corte, como demonstra a Figura 2.15. (Saini et al. [2012])

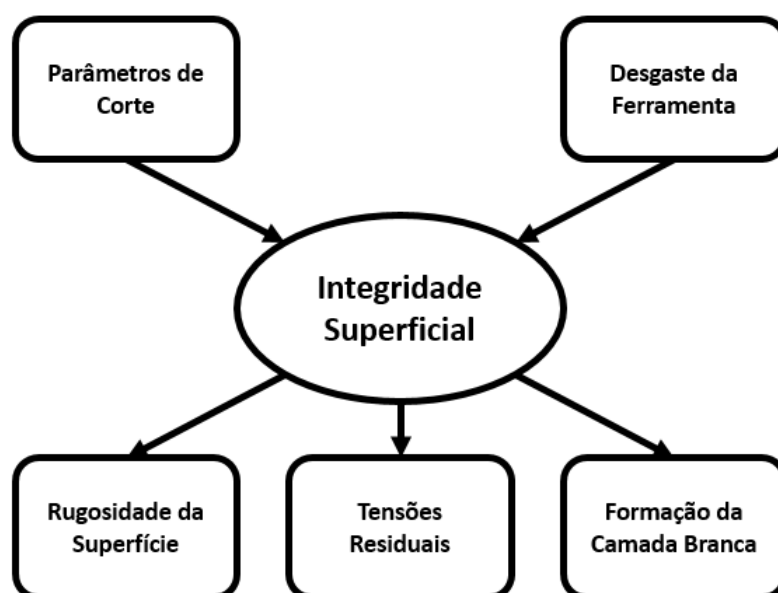


Figura 2.15: Maquinagem e parâmetros de corte afetam a integridade superficial. (Saini et al. [2012]) (adapt.)

### 2.7.1 Acabamento Superficial

O objetivo da maquinagem é produzir peças mecânicas, com superfícies funcionais, com precisão dimensional e geométrica adequada e, ainda, com o acabamento superficial requerido. Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de otimizar os parâmetros de corte em função da qualidade superficial desejada. Portanto, é de realçar alguns aspetos, dado que o acabamento superficial pode constituir um importante critério de avaliação da maquinabilidade.

O termo acabamento superficial engloba os defeitos de ondulação de 2<sup>a</sup> ordem e os defeitos micro-geométricos de superfície de 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> ordem (rugosidade periódica e aleatória), vulgarmente designados por rugosidade.

A caracterização completa da microgeometria das superfícies técnicas funcionais, ou seja, do acabamento superficial, necessita de três grupos de critérios: de amplitude, de espaçamento e híbridos. Entre os critérios de amplitude, a rugosidade média aritmética (Ra), a amplitude máxima de rugosidade (Rt) e a profundidade média da rugosidade (Rz) são os mais utilizados, sobretudo o Ra. Na maquinagem, os parâmetros Rt e Ra assumem especial importância por se poderem relacionar analiticamente com os parâmetros de corte, (Davim [2005]).

A técnica de avaliação da rugosimetria mais comum é utilizar um rugosímetro com apalpador de ponta de diamante (rugosimetria "clássica") e serve de suporte à aplicação dos critérios de rugosidade. No entanto, existem técnicas mais recentes que recorrem a modelos tridimensionais utilizando lentes e técnicas especiais de recolha de imagem da superfície, tais como *scanners 3D*, através de luz estruturada. No caso da rugosimetria "clássica", a leitura do perfil de rugosidade é feito num dado comprimento de palpação (ou exploração). Este comprimento subdivide-se em segmentos. Os valores obtidos no primeiro e no último comprimento de palpação não são utilizados para efeito de cálculo de parâmetros, por corresponderem às fases de aceleração e desaceleração do dispositivo de medida, o que pode introduzir erros na medição, (Davim [2008]).

Como foi referido anteriormente, o critério mais utilizado é a rugosidade média aritmética (Ra). Se definir a função  $Z(x)$  como a distância entre cada ponto do perfil e a linha média no comprimento de cálculo, obtém-se:

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_{L_m}^0 Z(x) dx \quad (2.4)$$

A profundidade média da rugosidade é definida como a distância média entre os cinco pontos mais altos dos picos e os cinco mais baixos dos vales, encontrados no comprimento de base e medido a partir de uma linha paralela à linha média e não cortando o perfil. Este é dado pela seguinte expressão:

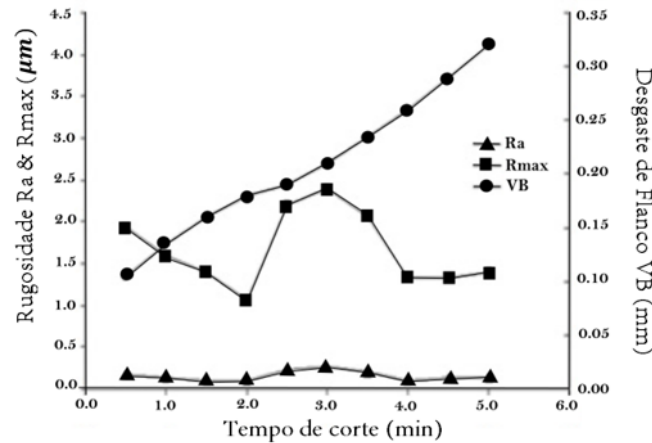
$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 z_{pi} - \sum_{i=1}^5 z_{vi} \right) \quad (2.5)$$

A precisão dimensional (intervalo de tolerância - IT) pode ser relacionado com a rugosidade média aritmética (Ra) através da seguinte expressão empírica:

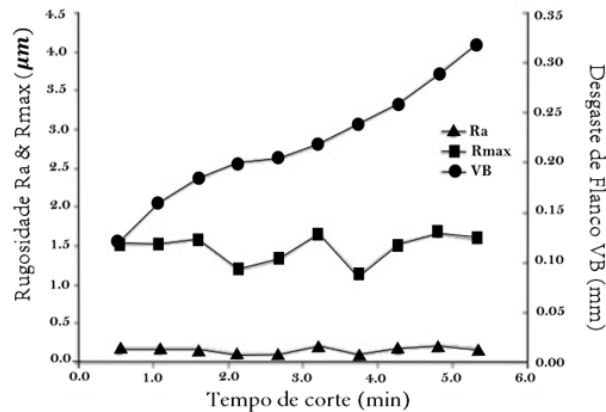
$$IT \approx 30R_a \quad (2.6)$$

Esta informação, obtida a partir da rugosidade da superfície maquinada, é de extrema importância na fase de projeto de um produto, dada a necessidade de especificar as tolerâncias dimensionais das superfícies.

Kundor et al. [2016], já anteriormente citados acerca da rugosidade da superfície, concluiu que esta não apresenta um papel importante no controlo da vida da ferramenta. À parte disso, em todas as condições de corte, a variação da rugosidade em relação ao desgaste não é importante. Durante os ensaios, o desenvolvimento do desgaste da ferramenta é quase proporcional ao tempo de corte e, de alguma maneira os valores da rugosidade média aritmética se mantiveram constantes e oscilaram horizontalmente. É possível verificar isto nas Figuras 2.16a e 2.16b. Esta pesquisa permitiu descobrir que a rugosidade da superfície não piora com o aumento do desgaste do flanco, bem como com o decorrer da vida da ferramenta.



(a)  $R_a$ ,  $R_{max}$  e VB a uma velocidade de corte de 50 m/min e um avanço de 0.04 mm/dente.



(b)  $R_a$ ,  $R_{max}$  e VB a uma velocidade de corte de 95 m/min e um avanço de 0.02 mm/dente.

Figura 2.16: Evolução da rugosidade e do desgaste de flanco em função do tempo de corte. Kundor et al. [2016] (adapt.)

## 2.8 Síntese

O estudo da geometria da aresta numa ferramenta de corte durante a fresagem de aços com elevada dureza é de extrema importância industrial. Torna-se, portanto, necessária a realização de ensaios que permitam estabelecer um conjunto de condições de corte ótimas, quer do ponto de vista tecnológico, quer do ponto de vista económico.

Operações de *hard machining*, mais concretamente *hard milling*, possibilitaram a dispensa do processo de electro-erosão (EDM) e permitiram atingir tempos de produção mais vantajosos do ponto de vista industrial. No entanto, são necessárias ferramentas capazes de se adequar às características específicas do material a maquinar. Como solução, são apresentadas neste projeto ferramentas de metal duro revestidas com  $AlTiN$  e  $TiAlN+TiN$  por PVD. As ferramentas de metal duro são as mais utilizadas na indústria, pois são capazes de atingir diferentes combinações de dureza a frio e a quente, resistência

ao desgaste e tenacidade, variando a sua composição. Contudo, ferramentas cerâmicas, de cermet, de nitreto de boro cúbico (CBN) e de diamante policristalino (PCD), são ferramentas aconselhadas por diversos autores, apresentando melhorias em relação as de metal duro.

A geometria de corte é um fator de influência na maquinabilidade dos materiais. São várias as geometrias analisadas no presente projeto, principalmente na aresta de corte (raio de ponta, face alisadora e chanfro), pois pretende-se determinar a geometria que apresenta melhor acabamento superficial, desempenho e durabilidade apresenta.

A conjugação dos aspetos acima citados tem sido alvo de estudo por diversos autores, cujos trabalhos foram apresentados ao longo do presente capítulo. Não só incidindo sobre o aço tratado, AISI D2, mas também sobre outros aços tratados, os autores basearam os seus trabalhos em alguns parâmetros de avaliação: desgaste da ferramenta de corte, acabamento superficial, precisão dimensional e força de maquinagem.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.



## Capítulo 3

# Procedimento Experimental

### 3.1 Material utilizado para a realização dos ensaios de corte

#### 3.1.1 Aço AISI D2

O aço AISI D2 insere-se no grupo dos aços ligados para ferramentas de trabalho a frio, tendo outras designações como demonstra a Tabela 3.1. No decorrer do texto, o aço em estudo será designado segundo a norma AISI.

Tabela 3.1: Designação do aço AISI D2 nas diversas normas.

AISI <sup>1</sup>	EURONORM <sup>2</sup>	UNE <sup>3</sup>	DIN <sup>4</sup>	Número (Europa)
D2	X 153 CrMoV 12	F-5211	X 155 CrVMo 12-1	1.2379

Este aço designa-se como um aço de trabalho a frio, sendo utilizado em processos que não envolvam aquecimento repetitivo ou prolongado a temperaturas entre os 205°C e 260°C. Todos os aços que se inserem neste grupo, devem possuir as seguintes características (Luz et al. [2010], Davim and Figueira [2007]):

- Elevada temperabilidade e baixa deformação, devido aos teores de Cr, Mn, Mo e em alguns casos V;
- Elevada resistência à abrasão fornecida pelo alto teor de carbono;
- Grande estabilidade dimensional no tratamento térmico;
- Elevada resistência ao desgaste e à compressão;
- Tenacidade elevada.

O aço AISI D2 é de excelência para ferramentas de corte e estampagem profunda e de formas complexas. As suas principais aplicações são: matrizes e punções, laminas para guilhotinas, navalhas e ferramentas para madeiras. As Tabelas 3.2 e 3.3, representam a composição química e as propriedades mecânicas do aço AISI D2.

---

<sup>1</sup>American Iron and Steel Institut

<sup>2</sup>European Norm

<sup>3</sup>Una Norma Espanola

<sup>4</sup>Deutsches Institut fur Normung

Tabela 3.2: Composição química do aço AISI D2 utilizando % em peso.<sup>1</sup>

<b>C (Carbono)</b>	1.45-1.60
<b>Si (Silício)</b>	0.10-0.60
<b>Mn (Manganês)</b>	0.20-0.60
<b>S (Enxofre)</b>	$\leq 0.030$
<b>P (Fósforo)</b>	$\leq 0.030$
<b>Cr (Crômio)</b>	11.0-13.0
<b>Mo (Molibdénio)</b>	0.70-1.00
<b>V (Vanádio)</b>	0.70-1.00

Tabela 3.3: Propriedades Mecânicas do aço AISI D2.<sup>1</sup>

<b>Temperatura (°C)</b>	20	200	400
<b>Densidade (<math>kg/m^3</math>)</b>	7700	7650	7600
<b>Coefficiente de Expansão - baixa temperatura</b>	-	$12.3 \times 10^{-6}$	-
<b>Coefficiente de Expansão - elevada temperatura</b>	-	$11.2 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$
<b>Condutividade Térmica (<math>W/m^{\circ}C</math>)</b>	20.0	21.0	23.0
<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>	210000	200000	180000
<b>Calor Específico (<math>J/kg^{\circ}C</math>)</b>	460	-	-

O aço AISI D2 tratado para trabalho a frio, foi sujeito a têmpera sob vácuo, pela *Ramada Aços*, tendo sido obtida uma dureza de 55 HRc e 61 HRc (Figura A.1, em Anexo).

Os provetes de aço AISI D2, fornecidos sob a forma de dois cilindros, possuíam um comprimento de 150 e 200 mm e um diâmetro de 120 e 150 mm, respetivamente. Na Figura 3.1, encontram-se representados os cilindros utilizados, com as diferentes superfícies a maquinar, para a realização dos ensaios.

<sup>1</sup>[http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-para-ferramentas-de-trabalho-a-frio/c-265\\_.html](http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-para-ferramentas-de-trabalho-a-frio/c-265_.html)

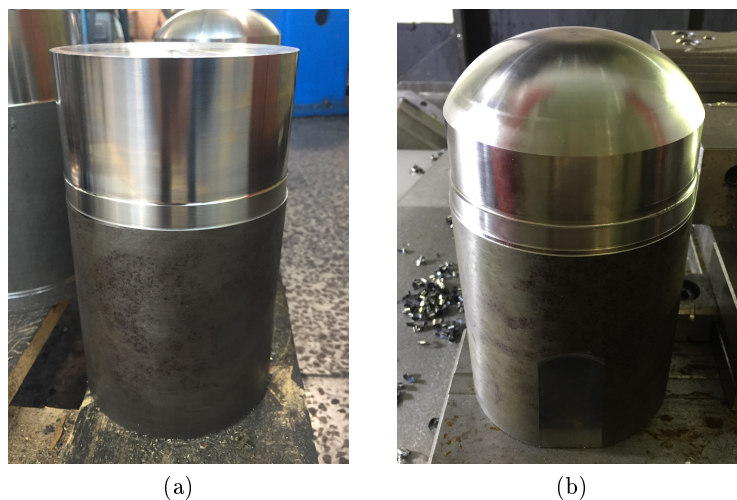


Figura 3.1: Provetes de aço AISI D2. a) Provete para os ensaios da superfície plana vertical, b) Provete para os ensaios da superfície 3D.

## 3.2 Máquina-Ferramenta

Para a realização dos ensaios de fresagem foi utilizado um centro de maquinagem MAS MCV 1270 (Figura 3.2), disponibilizado cordialmente pela *Palbit*. Este dispositivo possui uma potência de 48 kW, 8000 rpm de rotação máxima e um armazém de ferramentas com 24 posições. Informações mais detalhadas encontram-se na Tabela 3.4.



Figura 3.2: Centro de maquinagem MAS MCV 1270 utilizado nos ensaios. (Cortesia-*Palbit*)

<sup>1</sup><http://www.masmachinetools.com/mcv-1270-1>

Tabela 3.4: Características da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios.<sup>1</sup>

Marca e Modelo	MAS MCV 1270
Potência [kW]	48
Velocidade Máxima de Rotação [rpm]	8000
Nº de Posições de Armazenamento de Ferramentas	24
Tempo de Indexação de Ferramentas [s]	5
Distância Longitudinal Eixo X [mm]	1270
Distância Longitudinal Eixo Y [mm]	610
Distância Longitudinal Eixo Z [mm]	720
Posicionamento Rápido Eixo X [m/min]	40
Posicionamento Rápido Eixo Y [m/min]	40
Posicionamento Rápido Eixo Z [m/min]	40
Comando Numérico	HEIDENHAIN
Velocidade de Avanço [mm/min]	1-40000
Distância da árvore e mesa de trabalho [mm]	120-840

### 3.3 Ferramentas de corte utilizadas

Para a realização dos ensaios foram selecionadas três pastilhas de metal duro revestidas por PVD, duas com AlTiN e a outra com TiAlN+TiN. Ambas têm como finalidade efetuarem operações de acabamento em aços endurecidos. Duas pastilhas foram disponibilizadas e uma desenvolvida pela entidade acolhedora *Palbit*. Estas serão referidas como Amostra 1, Amostra 2 e Amostra 3 (Figura 3.3).

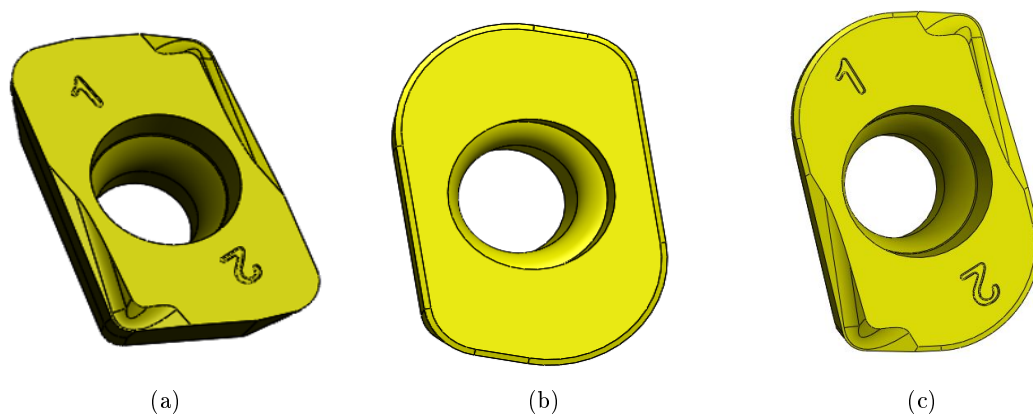


Figura 3.3: Ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. a) Amostra 1, b) Amostra 2, c) Amostra 3.

A fixação das amostras foi efetuada utilizando os respetivos suportes para cada uma delas. Tudo o que é referente às amostras e disposição destas nos suportes, encontra-se na Tabela 3.5.

As amostras são colocadas nos respetivos suportes com a disposição dos ângulos anteriormente referidos na Tabela 3.5. São suportes bastante diferentes. A amostra 1 e a amostra 3, apresentam uma geometria negativa/positiva (ângulo de ataque radial

Tabela 3.5: Informações detalhadas das amostras e respectivos suportes.

Amostras	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Raio de Ponta $r_\varepsilon$ [mm]	0.8	2.0	2.0
Face Alisadora	X	-	X
Chanfro	-	X	X
Processo de Revestimento	PVD		
Tipo de Revestimento	AlTiN (7 $\mu m$ )	TiAlN+TiN (4 $\mu m$ )	AlTiN (7 $\mu m$ )
Classe de Metal Duro	K05		
Percentagem de Cobalto [%]	7		
Tamanho de Grão	Sub-Microgrão (0.8 $\mu m$ )		
Suporte			
Ângulo de Ataque Axial $\gamma_{axial}$	+4°	-4°	+4°
Ângulo de Ataque Radial $\gamma_{radial}$	-8°	-4.5°	-8°
Ângulo de Folga $\alpha$	-8°	+11°	+8°
Ângulo de Posição da Aresta de Corte $\kappa_r$	90°	$\simeq 90^\circ$	90°

negativo e ângulo de ataque axial positivo) e a amostra 2, apresenta uma configuração duplamente negativa (ângulos de ataque radial e axial negativos).

De acordo com a teoria (Coromant [1996], Stephenson and Agapiou [2016] e ToolingU [2008]), a amostra 1 e a amostra 3 permitem maquinar elevados avanços por dente e elevadas profundidades de corte, pois um ângulo de ataque radial negativo permite obter elevada rigidez e um ângulo de ataque positivo direciona as aparas para fora do suporte. Esta configuração é capaz de lidar com materiais difíceis de maquinar e realizar operações de acabamento. Contudo, a mais indicada para maquinar aços temperados é a configuração duplamente negativa (amostra 2), pois permite a utilização de classes de metal duro com durezas mais elevadas nas pastilhas, o que provoca um aumento de resistência ao desgaste.

É possível visualizar os ângulos axiais na Figura 3.4 e os ângulos radiais na Figura 3.5.

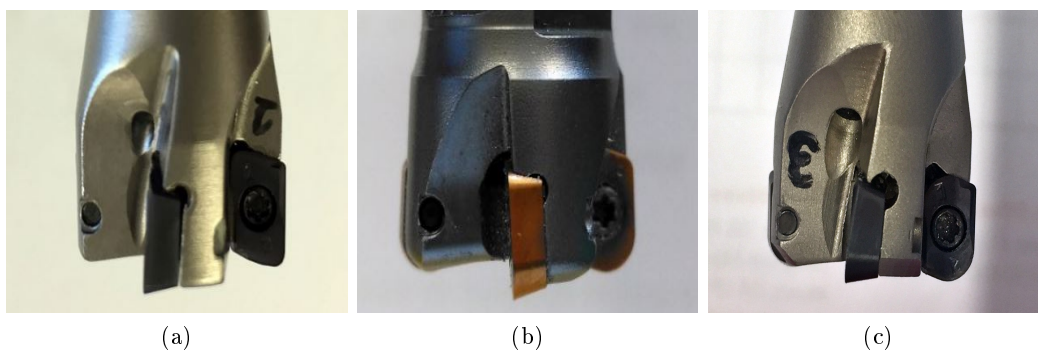


Figura 3.4: Suportes das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. a) Suporte da amostra 1, b) Suporte da amostra 2, c) Suporte da amostra 3.

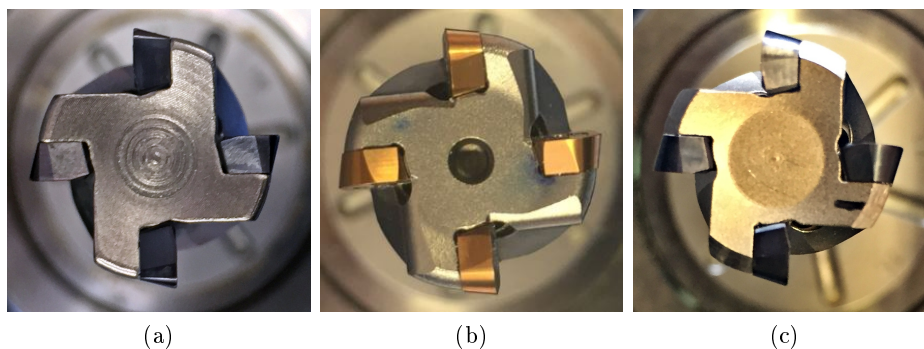


Figura 3.5: Vista de trabalho dos suportes das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. a) Suporte da amostra 1 (vista de trabalho), b) Suporte da amostra 2 (vista de trabalho), c) Suporte da amostra 3 (vista de trabalho).

Existem vários tipos de sistemas de fixação (dispositivo que age como uma interface intercambiável entre o fuso de uma máquina-ferramenta e uma ferramenta de corte) para as ferramentas. Para o presente projeto, foi escolhido um cone hidráulico (Figura 3.6). O cone hidráulico (*SCHUNK* - ISO 50) utiliza um reservatório de óleo para equilibrar a pressão de fixação em torno da ferramenta. Este é capaz de amortecer vibrações devido ao reservatório. É indicado para operações de acabamento. (Moroni [2009])

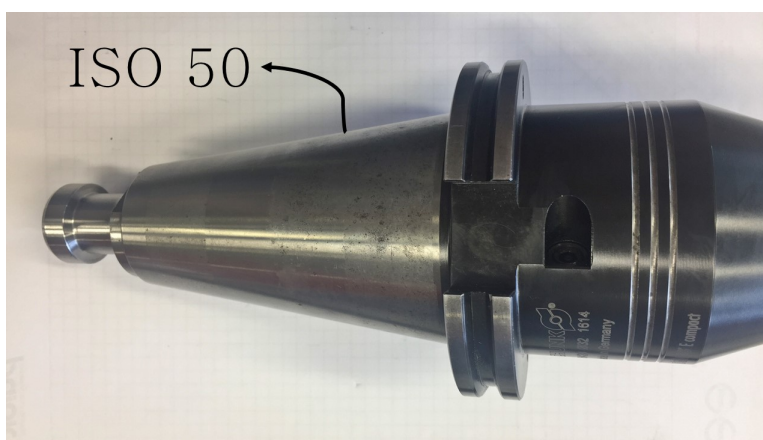
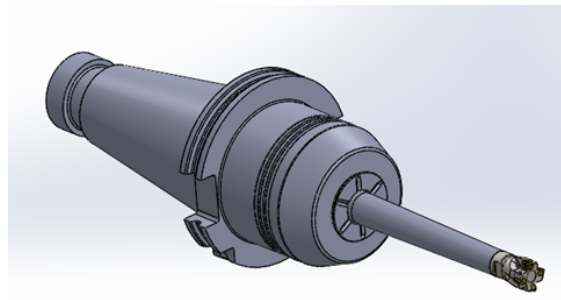


Figura 3.6: Cone hidráulico utilizado (*SCHUNK* - ISO 50).

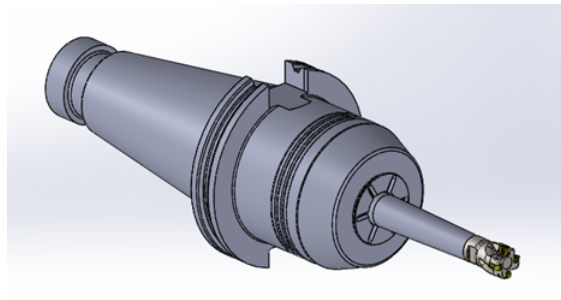
### 3.3.1 Alongadores

Foram utilizados dois alongadores ou adaptadores anti-vibratórios de 100 e 60 mm, possíveis de visualizar na Figura 3.7, que permitiriam a ferramenta de trabalho alcançar maior profundidade possível dos cilindros. Tendo em conta que a principal aplicação desta ferramenta de corte é a maquinagem de molde, conseguir um bom funcionamento desta a uma distância considerável da árvore pode ser uma mais valia para a sua aplicação.

Informações sobre os adaptadores encontram-se em Anexo na Figura A.2 e na Tabela A.2.



(a) Vista tridimensional do adaptador de 100m.



(b) Vista tridimensional do adaptador de 60mm.

Figura 3.7: Adaptadores utilizados nos ensaios.

### 3.4 Ensaios Realizados

O procedimento experimental para avaliar a geometria das amostras, o desgaste destas e o acabamento superficial no aço AISI D2, divide-se em dois grupos:

- Ensaios preliminares;
- Ensaios efetivos.

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo obter parâmetros de corte ideais (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), de modo a alcançar um ensaio efetivo. Estes também serviram para estudar o efeito de vibração dos adaptadores.

Os ensaios efetivos foram realizados com parâmetros de corte capazes de executar um ensaio onde fosse possível retirar conclusões viáveis. Estes foram divididos em dois grupos:

- Ensaios curtos;
- Ensaios longos.

Os ensaios curtos visaram avaliar a influência dos parâmetros de corte no acabamento superficial, de modo a avaliar a rugosidade na superfície maquinada. Estes estão divididos em dois grupos:

- Superfície a maquinar plana vertical;
- Superfície a maquinar 3D.

Os ensaios longos têm como objetivo estudar o tempo de vida da ferramenta de corte em função dos parâmetros de corte selecionados nos ensaios preliminares, bem como avaliar o acabamento superficial com a evolução do desgaste da ferramenta.

### 3.4.1 Ensaios Curtos

Para avaliar a influência da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte no acabamento superficial e na rugosidade, em ambos os cilindros de diferentes durezas, foi realizado o seguinte procedimento:

- Para **maquinar a superfície plana vertical**: Este ensaio serviu para analisar a geometria das amostras, mais concretamente, o fato das amostras possuírem raios diferentes e duas delas, face alisadora na aresta principal de corte.

O cilindro foi dividido em quatro secções, como é possível de visualizar na Figura 3.10. Em cada uma delas foi utilizado um avanço diferente, mas para todas elas a velocidade de corte foi constante. Cada secção tinha um comprimento de 15 mm.

A ferramenta realizou um movimento de corte em contorno e, sempre que terminava uma secção, retornava à sua posição inicial. Este procedimento foi realizado para as três amostras, nas duas durezas, recorrendo a uma maquinagem a seco.

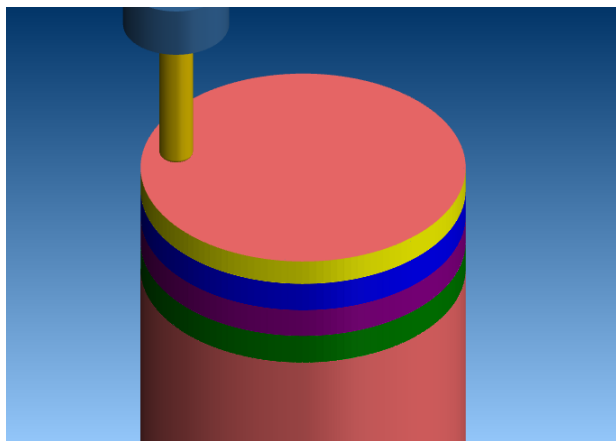


Figura 3.8: Representação do ensaio curto na superfície plana vertical para avaliação da rugosidade.

- Para **maquinar a superfície 3D**: Este ensaio permite avaliar a influência de vários conjuntos de elementos na geometria da aresta de corte. Foi tido em conta este ensaio, para perceber qual amostra apresenta a melhor superfície maquinada.

O cilindro foi sujeito a torneamento (Figura 3.9), numa operação de desbaste, para obtenção da superfície 3D.





Figura 3.9: Cilindro após torneamento da superfície 3D.

Foram realizadas quatro maquinagens. Em cada uma delas foi utilizado um avanço diferente, mas para todas elas a velocidade de corte e a profundidade de corte foi constante. A ferramenta realizou um movimento de corte em contorno e, sempre que terminava uma secção, retornava à sua posição inicial. Este procedimento foi realizado para as três amostras, nas duas durezas, recorrendo a uma maquinação a seco.

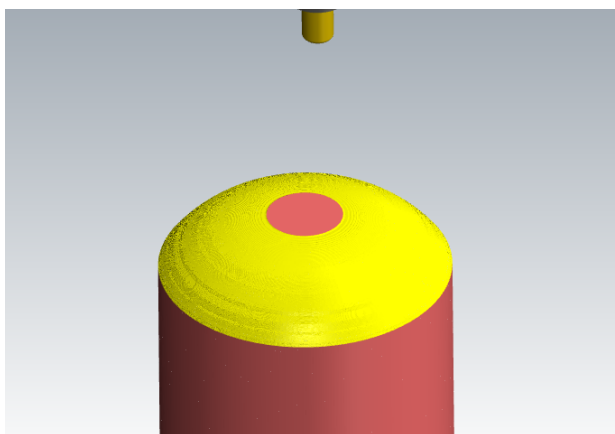


Figura 3.10: Representação do ensaio curto em superfície 3D para avaliação da rugosidade.

### 3.4.2 Ensaios Longos

Para avaliar o desgaste da ferramenta, realizou-se um ensaio onde a ferramenta percorreu uma secção com velocidade de corte, avanço e profundidade de corte constante, representado na Figura 3.11, recorrendo a maquinação a seco.

O ensaio realizou o número de passagens necessárias até atingir o critério de vida pretendido ( $VB=0.2$  mm).

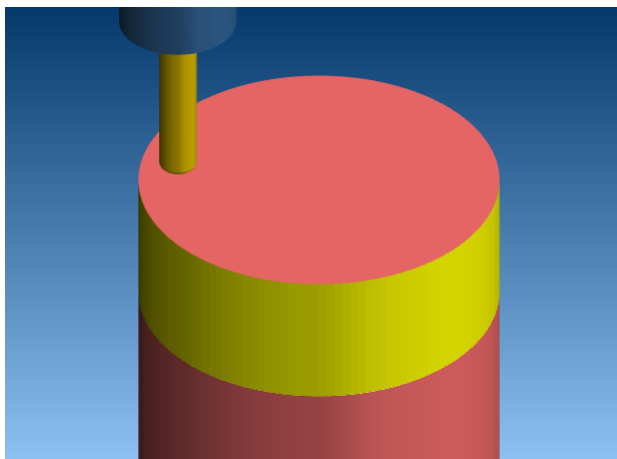


Figura 3.11: Representação dos ensaios longos para avaliação do desgaste da ferramenta.

### 3.5 Parâmetros de Corte

Nesta secção, encontram-se os valores para os parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

- **Ensaio Preliminares:** Os parâmetros de corte foram escolhidos de acordo com um catálogo da ferramenta da concorrência. Os primeiros ensaios foram realizados com a amostra 1 e o adaptador de 100 mm no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Todos os ensaios preliminares se encontram na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios preliminares realizados no aço AISI D2 de dureza 55 HRc.

Ensaio Preliminares				
	Vc [m/min]	fz [mm/dente]	ae [mm]	ap[mm]
Amostra 1	75	0.2	0.2	
Amostra 1		0.1		
Amostra 2		0.1		

Estes ensaios permitiram analisar o efeito do adaptador na superfície maquinada. Foi possível concluir que para a realização de um ensaio efetivo, o adaptador teria de apresentar menor comprimento, devido ao excesso de vibrações provocado pelo adaptador anterior.

- **Ensaio Efetivos e Longos:** estes foram realizados com o adaptador de 60 mm. Os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tabela 3.7 e 3.8 para as durezas 55 e 61 HRc, respetivamente. Conforme o catálogo da ferramenta da amostra 2, para uma dureza inferior a 60 HRc, a velocidade de corte recomendada é de 75 m/min. Para uma dureza superior, a velocidade de corte aconselhável é de 65 m/min.

Tabela 3.7: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios longos realizados no aço AISI D2 de dureza 55 HRc.

Ensaio Longo			
Vc [m/min]	fz [mm/dente]	ae [mm]	ap [mm]
75	0.1	0.2	

Tabela 3.8: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios longos realizados no aço AISI D2 de dureza 61 HRc.

Ensaio Longo			
Vc [m/min]	fz [mm/dente]	ae [mm]	ap [mm]
65	0.1	0.2	

- **Ensaio Efetivo e Curto:** foi mantida a velocidade de corte, a profundidade de corte e de largura constantes, variando apenas o avanço. Os parâmetros de corte utilizados encontram-se na Tabela 3.9 para as durezas 55 e 61 HRc, respectivamente.

Tabela 3.9: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios curtos, na superfície plana vertical e na 3D, realizados no aço AISI D2 de dureza 55 e 61 HRc.

Ensaio Curto (Sup. Plana e 3D)			
Vc [m/min]	fz [mm/dente]	ae [mm]	ap [mm]
75	0.05	0.2	
	0.10		
	0.15		
	0.20		

### 3.6 Procedimentos Antes de Maquinar

Antes da realização de qualquer ensaio de maquinagem, foi efetuado sempre o mesmo procedimento:

- Colocação das pastilhas, medição e inspeção das respectivas ferramentas de corte, Venturion da Zoller;
- Elaboração do programa, CAM MasterCam X9;
- Realização do zero peça do cilindro no centro de maquinagem, MAS MCV 1270.

#### 3.6.1 Medição e Inspeção da Ferramenta de Corte

Para medir e inspecionar a ferramenta de corte, foi utilizada a máquina universal de medição, *Venturion* da *Zoller* (Figura 3.12). Esta permite medir e gravar geometrias axiais da ferramenta de corte, através de uma câmara giratória com luz incidente. Dispõem de inspeção da aresta de corte, medição do comprimento da ferramenta, de um fuso de elevada precisão (ISO 50) e de uma impressora para documentar todas as medições.

Este procedimento têm como objetivo garantir uma concentricidade do suporte inferior a  $25\ \mu m$ . Define-se concentricidade como a variação admissível da posição do eixo de simetria de elementos teoricamente concêntricos. O campo de tolerância do desvio de concentricidade é delimitado por um círculo em cujo centro se encontra a linha de simetria de um elemento de referência. O valor medido da concentricidade (ou batimento radial) é a diferença entre o dente mais afastado do eixo e o dente mais próximo deste, a dividir por dois. Com este procedimento, foi possível eliminar erros de montagem que pudessem influenciar o desempenho do suporte.

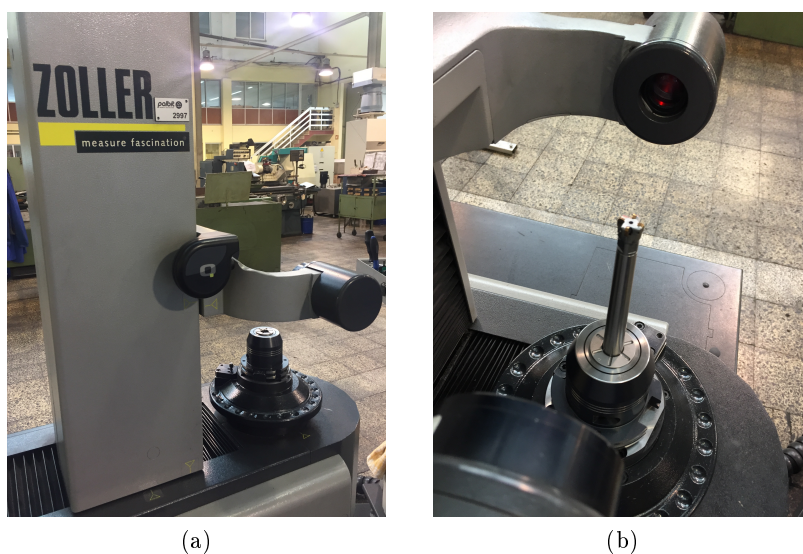


Figura 3.12: Máquina universal de medição, "Venturion" da Zoller. (Cortesia-Palbit)

### 3.6.2 Elaboração do Programa CAM

Para a realização do programa CAM, foi utilizado o *software MasterCam X9*, disponibilizado pela *Palbit*, onde foram selecionadas operações de contorno 2D e 3D (Figura 3.13a). A elaboração do código foi feita em linguagem Heidenhain. (Figura 3.13b)

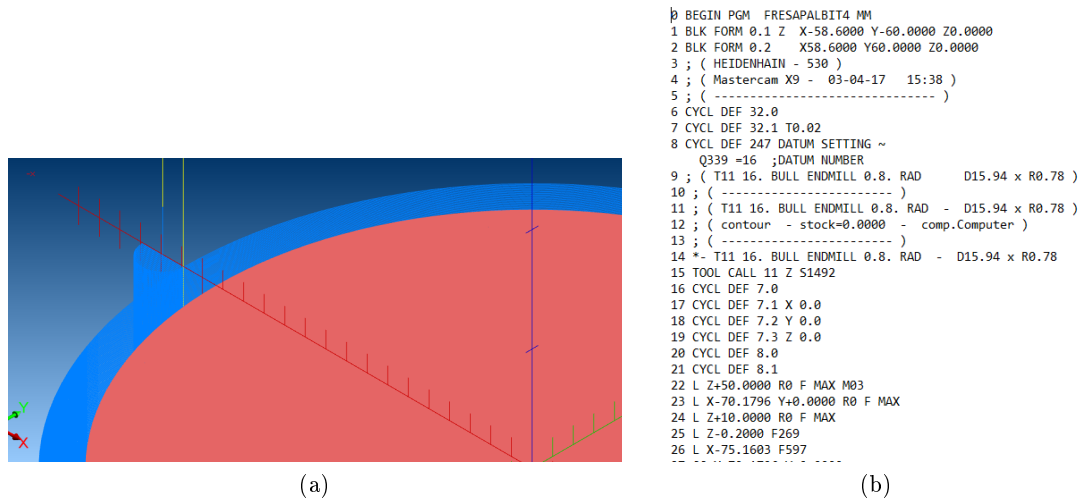


Figura 3.13: Elaboração do programa CAM. a) Elaboração do programa no *MasterCam X9*, b) Elaboração do código em linguagem Heidenhain.

### 3.6.3 Procedimento realizado na Máquina-Ferramenta

Após a passagem do programa para a máquina-ferramenta, foi realizado o zero peça do cilindro, onde são retiradas todas as medições com uma ferramenta de calibre (no eixo x, y e z, representadas nos pontos assinalados na Figura 3.14a).

De seguida, foram memorizadas as coordenadas na gestão de pontos de referência da máquina. Posteriormente, é colocada a ferramenta no fuso da árvore, medida e realizada a apalpação (Figura 3.14b), ou seja, confirmada a altura e o diâmetro desta.

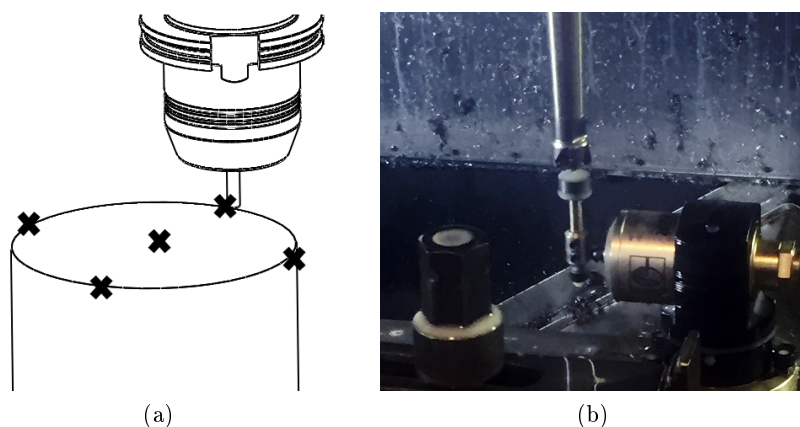


Figura 3.14: Procedimento realizado na CNC. a) Zero peça do cilindro, b) Apalpação da ferramenta.

## 3.7 Método para caracterização da superfície

Para a caracterização da superfície maquinada, foi utilizada a rugosimetria. O aparelho utilizado foi o *Tesa-Rugosurf 10-G* (Figura 3.15) com um apalpador de diamante

capaz de medir em três posições:  $0^\circ$ ,  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ . Este dispositivo apresenta uma resolução máxima de  $0,001 \mu m$ , cut-off de  $0,8 \text{ mm}$ , um campo de medição de cerca de  $400 \mu m$  segundo o eixo Z, e  $16 \text{ mm}$  segundo o eixo X, e está incluído na categoria 1 de precisão segundo a norma ISO 3274.



Figura 3.15: Rugosímetro *Tesa-Rugosurf 10-G*. (Cortesia-Palbit)

Recolheram-se os valores da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), a amplitude máxima da rugosidade ( $R_t$ ) e a profundidade média da rugosidade ( $R_z$ ). As medições de rugosidade foram efetuadas de forma a que o deslocamento do apalpador fosse feito o mais perpendicularmente possível ao movimento de corte da ferramenta.

### 3.8 Método para Avaliação do Desgaste

A avaliação do desgaste da ferramenta foi efetuada utilizando um microscópio digital, *Dino-Lite Digital Microscope* (Figura 3.16), com o respetivo *software*, *DinoCapture 2.0*, que permitiu a medição do desgaste e a realização de imagens às pastilhas. Apresenta uma objetiva de ampliação de  $250\times$ , um sensor de  $1,3 \text{ Megapixels}$ , com um polarizador ajustável incorporado que reduz o brilho e o reflexo.

As pastilhas foram retiradas da ferramenta de corte e foram efetuadas medições de desgaste na face de saída das pastilhas, recorrendo a microscopia ótica.



Figura 3.16: Microscópio Digital *Dino-Lite Digital Microscope*. (Cortesia-Palbit)

### 3.9 Levantamento Geométrico da Ferramenta de Corte - Amostra 2

A pastilha correspondente à amostra 3 foi desenvolvida de forma a tentar obter um melhor desempenho do que as outras duas. A geometria de base partiu da amostra 1, de forma a que fosse possível montá-las no mesmo suporte de fresagem.

Foi feito inicialmente um esboço da amostra 2 (Figura 3.17), para retirar todas as variáveis necessárias para o levantamento geométrico desta. As marcações designadas por a), b) e c) foram as dimensões retiradas através dos equipamentos de seguida referidos:

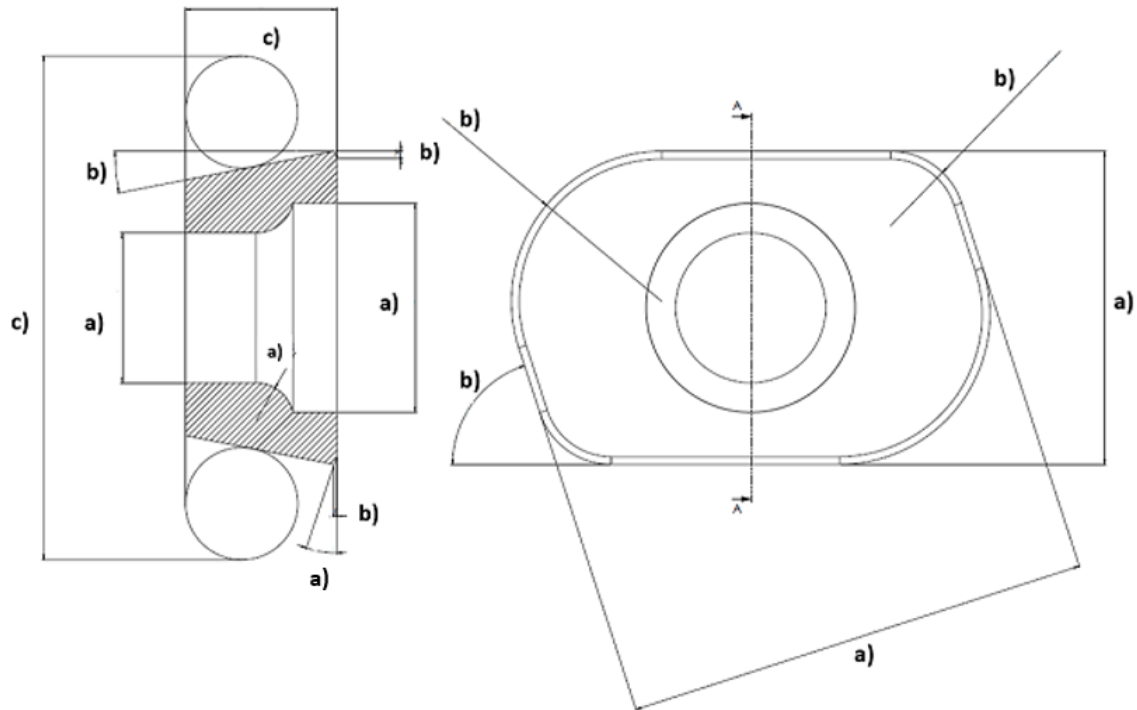


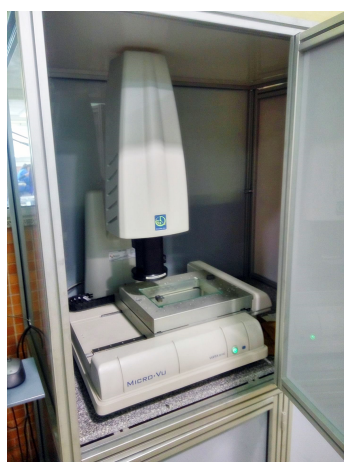
Figura 3.17: Esboço realizado para levantamento geométrico da amostra.

- **Projektor de perfil ótico *Mitutoyo PJ-A3000 Vertical Profile*:** As medições realizadas com este equipamento (Figura 3.18) estão designadas na Figura 3.17 pela marcação a).
- **Projektor de perfil digital *Micro-Vu Vertex Multisensor Measuring Center*:** Com a ajuda do *software InSpec Metrology* disponibilizado pelo equipamento (Figura 3.19), foi possível medir todos os contornos da pastilha. As medições realizadas estão identificadas na Figura 3.17 pela marcação b).
- **Comparador:** Foi utilizado um comparador para medir distâncias entre cilindros e alturas. Estas medidas estão representadas na figura 3.17 pela marcação c).
- ***SolidWorks*:** Após o estudo e levantamento geométrico, a nova geometria foi desenvolvida com recurso a este *software* de CAD.
- **Equipamento de medição por coordenadas 3D, *ZEISS DuraMax*:** A utilização deste equipamento (Figura 3.20) permitiu o levantamento dos planos do alojamento da amostra 2 no seu respetivo suporte. Foi possível desenvolver um ficheiro CAD (Figura 3.21) de modo a retirar todos os ângulos necessários (ângulos de ataque radial e axial).





Figura 3.18: Projetor de perfil ótico: *Mitutoyo PJ-A3000 Vertical Profile* (Cortesia-Palbit).



(a)



(b)

Figura 3.19: Projetor de perfil digital: *Micro-Vu Vertex Multisensor Measuring Center*. (Cortesia-Palbit).

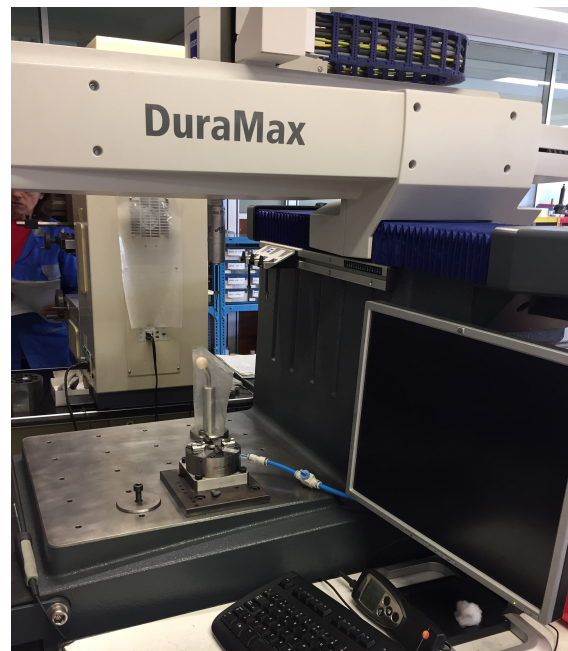


Figura 3.20: Equipamento de medição por coordenadas 3D, *ZEISS DuraMax* (Cortesia-*Palbit*).

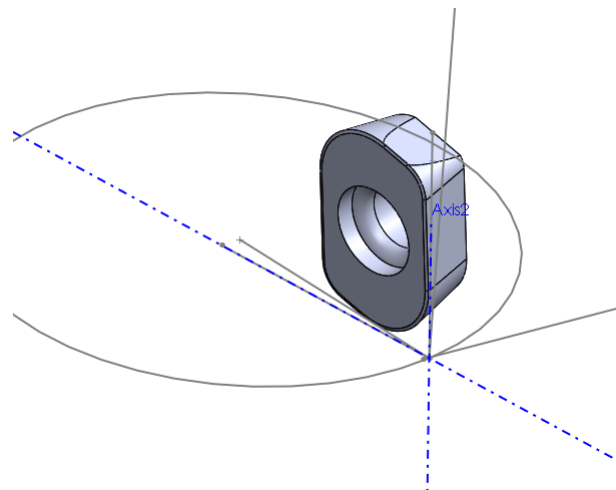


Figura 3.21: Ficheiro CAD fornecido pelo equipamento *ZEISS DuraMax* (Cortesia-*Palbit*).

## Capítulo 4

# Análise e Discussão de Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios de fresagem realizados no aço AISI D2 (55 e 61 HRc), com ferramentas de corte de metal duro: duas revestidas com  $AlTiN$  e outra por  $TiAlN + TiN$  por PVD. Posteriormente, é efetuada uma análise detalhada ao desgaste e vida das ferramentas, bem como à rugosidade superficial obtida por cada ferramenta.

É descrito também o desenvolvimento de uma nova ferramenta de corte, de modo a conjugar geometrias de duas ferramentas de corte previamente existentes, criadas para o mesmo efeito: um processo de fresagem numa operação de acabamento em aços endurecidos.

O respetivo desenho técnico e as alterações efetuadas ao suporte desta nova amostra, também serão referidas.

### 4.1 Desenvolvimento de uma nova Ferramenta de corte

Considerando que um dos objetivos do presente trabalho consiste em estudar a geometria da aresta de corte e o efeito que esta tem na superfície maquinada, foi desenvolvida uma ferramenta de corte, doravante designada por amostra 3, que conjugasse elementos que pudessem melhorar o seu desempenho.

Foi elaborado um levantamento geométrico da ferramenta de corte designada por amostra 2, com o auxílio de todos os equipamentos referidos no procedimento experimental e procedeu-se à modelação desta no *Solidworks*. Foi possível retirar todos os parâmetros necessários da preparação da aresta de corte da amostra 2, raio de ponta e chanfro, e daí combinar com os parâmetros da amostra 1, raio de ponta e face alisadora, para criação de uma nova ferramenta. A modelação da amostra 3 encontra-se na Figura 4.1.

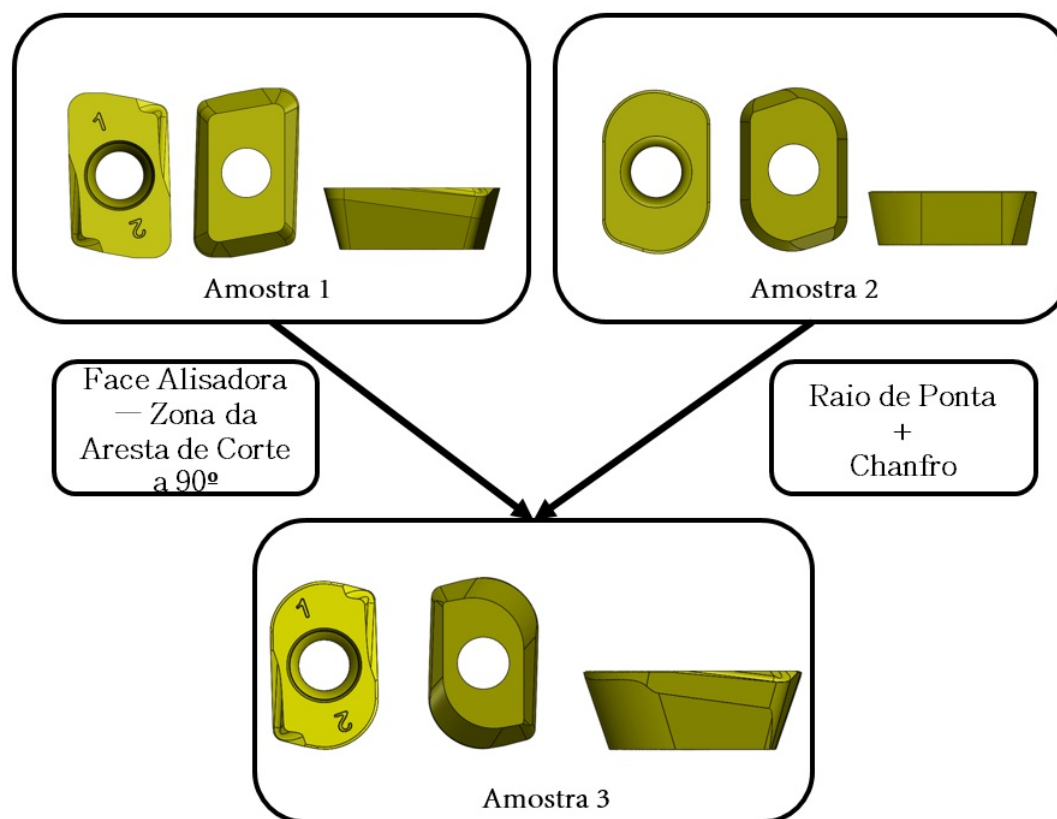


Figura 4.1: Modelação da amostra 3.

#### 4.1.1 Desenho Técnico

Após a conclusão da modelação, procedeu-se à elaboração da documentação técnica, cuja Figura se encontra representada em Anexo (Figura A.3).

#### 4.1.2 Desenvolvimento do suporte

Após a conclusão da amostra 3, procedeu-se ao desenvolvimento do respetivo suporte. Foi utilizado o suporte da amostra 2, sendo este sujeito a um processo de retificação, devido ao elevado raio de ponta da amostra 3. O suporte inicialmente utilizado encontra-se na Figura 4.2, assim como o excesso de material que foi removido. Na Figura 4.3 é apresentado o suporte final utilizado, já com as respetivas alterações.

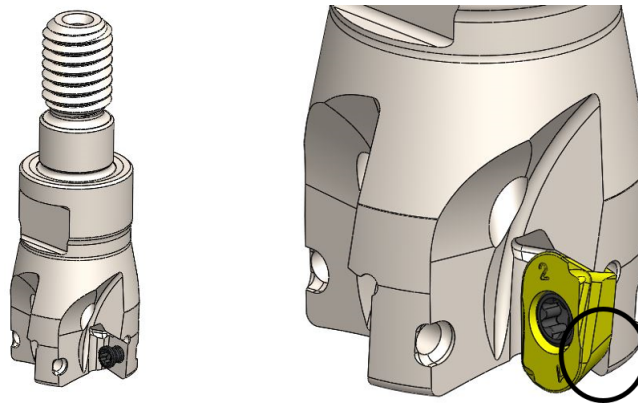


Figura 4.2: Suporte utilizado para a amostra 3, assim como a marcação da retificação.

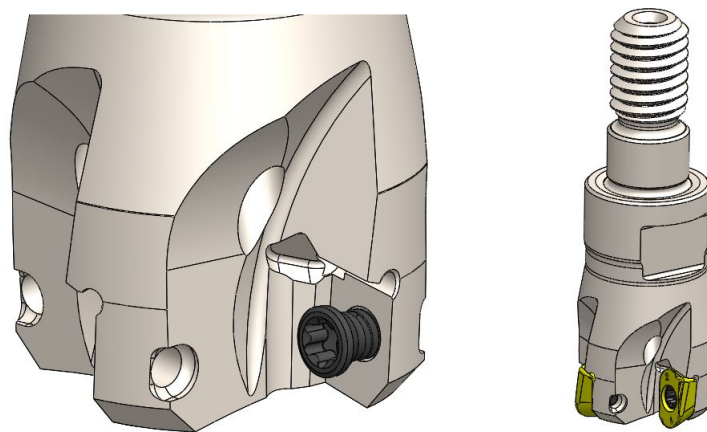


Figura 4.3: Suporte com as respectivas alterações.

## 4.2 Avaliação dos Adaptadores no Acabamento Superficial

O presente estudo tem como objetivo maquinar aços endurecidos utilizados na indústria de moldes, matrizes e punções. Pretende-se, portanto, garantir um bom acabamento superficial com a ferramenta de corte a maquinar o mais afastada possível da árvore da máquina-ferramenta. Foi então utilizado, nos ensaios preliminares, um adaptador de comprimento admissível de 100 mm, ao qual acresce o comprimento da fresa. Estes ensaios permitiram avaliar o efeito dos adaptadores na superfície maquinada.

Na Tabela 4.1, encontram-se as superfícies maquinadas nos diferentes ensaios realizados. É possível visualizar que, com uma ferramenta de corte de apenas 16 mm de diâmetro e com um adaptador de 100 mm, a superfície maquinada por esta apresenta um mau acabamento, claramente provocado pelo excesso de vibrações.


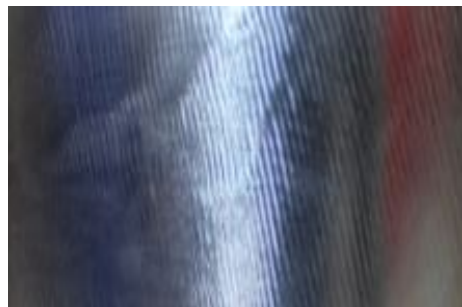

Foi possível concluir que o efeito verificado tem origem na relação comprimento/diâmetro (L/D) da ferramenta de corte, visto que se tratava de uma ferramenta muito pequena (diâmetro 16 mm) para um adaptador de comprimento 100 mm.

Oliveira [2007] utilizou o método dos elementos finitos para comparar a rigidez das ferramentas entre diferentes diâmetros (8, 12 e 16 mm), utilizando um adaptador de

70 mm. O autor concluiu que a rigidez de um sistema de fixação reduz em função da redução do diâmetro da ferramenta, e a diminuição da rigidez deste afeta a estabilidade provocando assim um aumento de vibrações.

Assim alterou-se o adaptador para um comprimento admissível de 60 mm e onde foram obtidos os respectivos ensaios efetivos.

Tabela 4.1: Aspetto visual das superfícies maquinadas com diferentes parâmetros de corte no aço AISI D2 de dureza 55 HRc.

Ensaio Preliminares		
<b>Parâmetros de Corte:</b> $V_c = 75 \text{ m/min}$ $f_z = 0.2 \text{ mm/dente}$	Amostra 1	
<b>Parâmetros de Corte:</b> $V_c = 75 \text{ mm/min}$ $f_z = 0.1 \text{ mm/dente}$	Amostra 1	
<b>Parâmetros de Corte:</b> $V_c = 75 \text{ mm/min}$ $f_z = 0.1 \text{ mm/dente}$	Amostra 2	

### 4.3 Avaliação do Desgaste das Ferramentas de Corte

Os ensaios realizados para a determinação do desgaste das ferramentas de corte ocorreram com velocidades de corte 75 e 65 m/min, mantendo constante o avanço em 0.10 mm/dente e com uma profundidade de corte e largura de 0.20 mm, para as respectivas durezas 55 e 61 HRc. O desgaste da ferramenta de corte foi medido na face de saída, com um critério de vida adotado de 0.20 mm ( $VB_{max} = 0.20 \text{ mm}$ ).

Os gráficos das Figuras 4.4 e 4.5 mostram as curvas de desgaste obtidas pelas ferramentas de corte no aço AISI D2, utilizando como velocidade de corte 75 m/min e 65 m/min, e um avanço por dente de 0.10 mm/dente, para as durezas 55 e 61 HRC, respetivamente.

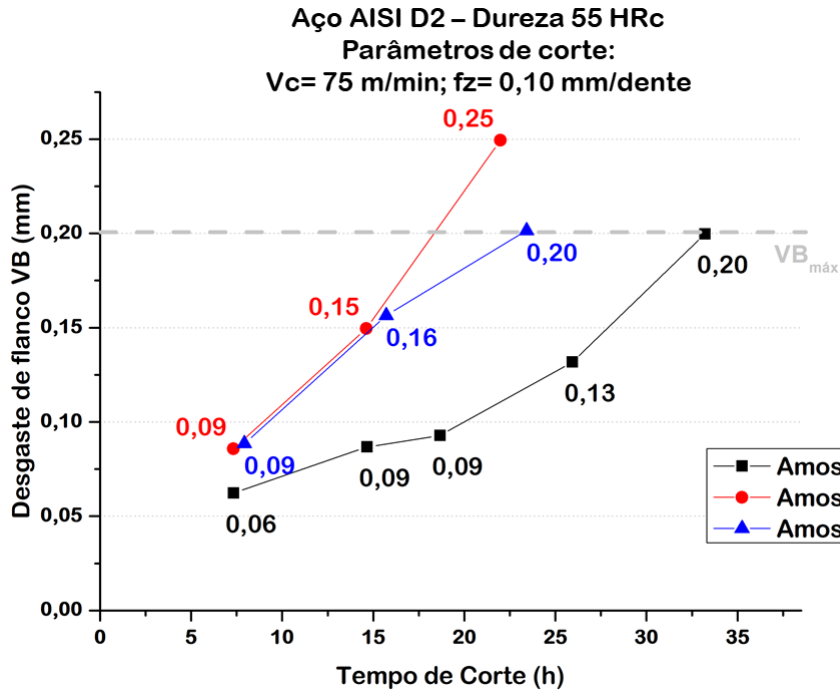


Figura 4.4: Curvas de vida das ferramentas de corte para o aço AISI D2 de dureza 55 HRC. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro)

Observando o gráfico da Figura 4.4, é possível afirmar que o desgaste das ferramentas aumenta com a progressão do tempo de maquinagem, e que as curvas de desgaste representadas podem ser divididas em três fases distintas. Numa fase inicial, todas as amostras apresentam um comportamento de desgaste semelhante e uniforme. Numa fase intermédia, as amostras 2 e 3 aumentam abruptamente o seu desgaste de flanco em relação à amostra 1 e, como se trata de geometrias semelhantes, era de esperar que o comportamento ao desgaste fosse semelhante. Numa fase final, a amostra 1 demonstra um desgaste da face de saída uniforme, enquanto que as restantes amostras evidenciam um desgaste final abrupto.

Observando o gráfico da Figura 4.5, é possível verificar que o desgaste das ferramentas de corte aumenta à medida que o tempo de maquinagem avança, e o comportamento da amostra 2 e 3 é semelhante. Contudo o gráfico não é dividido em três zonas distintas como o ensaio anterior. Existe uma discrepância no desgaste das amostras, contrariamente ao ensaio anterior. A amostra 3 apresentou um desempenho inferior que a amostra 2, permitindo concluir que a geometria desenvolvida para esta dureza não se encontra tão bem preparada como as ferramentas de corte já existentes. A amostra 1 foi a que demonstrou os melhores resultados para o aço desta dureza.

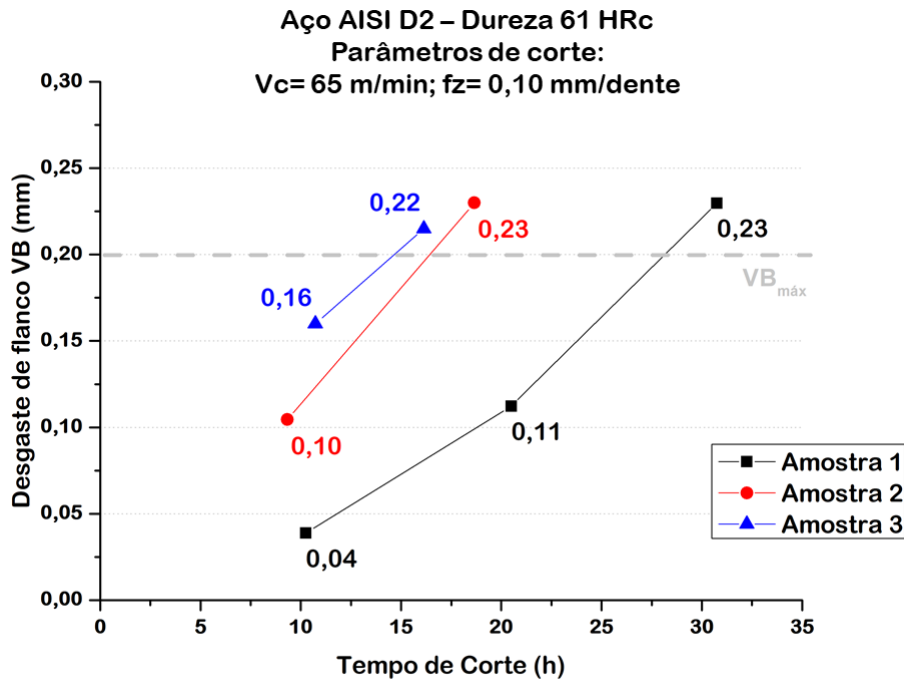


Figura 4.5: Curvas de vida das ferramentas de corte para o aço AISI D2 de dureza 61HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon = 0.8$  mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon = 2.0$  mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon = 2.0$  mm, face alisadora e chanfro)

#### 4.3.1 Desgaste da Ferramenta de Corte - Amostra 1

É possível visualizar a evolução do desgaste ao longo do processo de maquinagem, da ferramenta de corte - Amostra 1 - em ambas as durezas, nas Figuras 4.6 e 4.7. As imagens correspondem às etapas de verificação realizadas às pastilhas (indicada pelos pontos representados nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5).

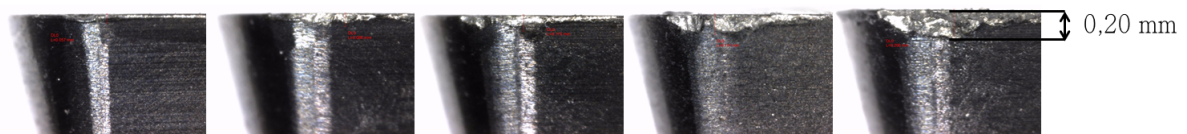


Figura 4.6: Evolução do desgaste da amostra 1 (250x) no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon = 0.8$  mm e face alisadora)



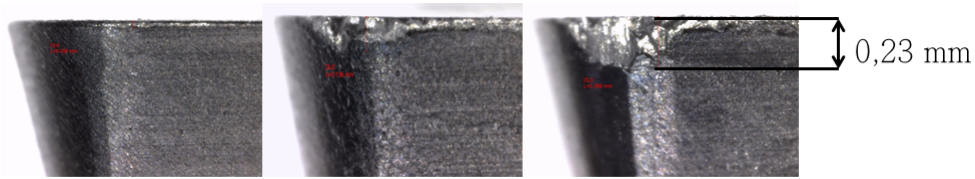


Figura 4.7: Evolução do desgaste da amostra 1 (250x) no aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm e face alisadora)

Durante todo o processo, a amostra 1 apresentou um desgaste de flanco bastante contínuo, devido aos parâmetros de corte. Caso o avanço por dente fosse superior a 0.10 mm/dente, a amostra apresentaria lascamento na face de saída. A perda de material da amostra 1 foi relevante entre o raio de ponta e a face alisadora. Na Figura 4.8, é possível visualizar o movimento da amostra quando se encontra a maquinar: a área a vermelho representa a zona de contacto da pastilha com a peça.

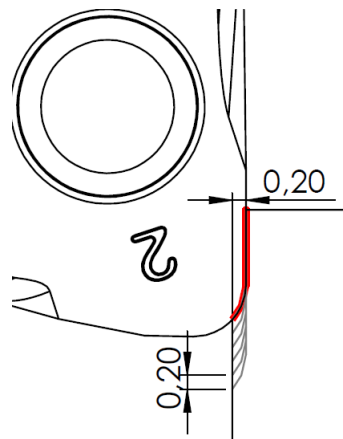


Figura 4.8: Zona de contacto da amostra 1 com a peça.

#### 4.3.2 Desgaste da Ferramenta de Corte - Amostra 2

O mesmo foi executado para a ferramenta de corte - Amostra 2. A evolução do desgaste ao longo do processo de maquinagem, em ambas as durezas, encontra-se nas Figuras 4.9 e 4.10. As imagens correspondem às passagens realizadas (indicada pelos pontos representados nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5).

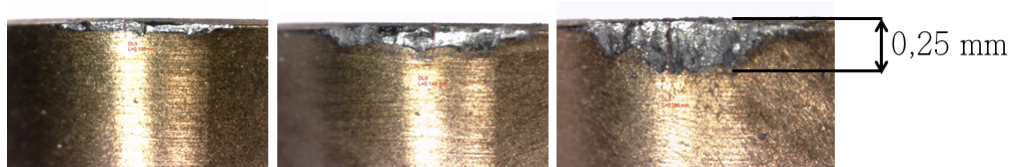


Figura 4.9: Evolução do desgaste da amostra 2 (250x) no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro)

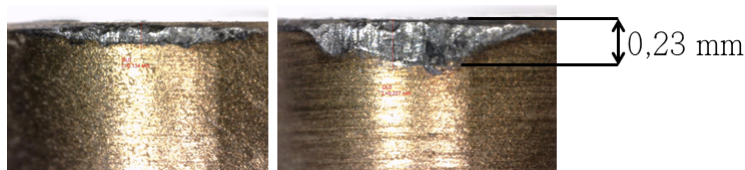


Figura 4.10: Evolução do desgaste da amostra 2 (250x) no aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro)

Do mesmo modo, a amostra 2 também apresentou um desgaste de flanco uniforme. A perda de material foi relevante na maior parte do raio de ponta, devido à pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta. Na Figura 4.11 é possível visualizar o movimento da amostra quando se encontra a maquinar: a área a vermelho representa a zona de contacto da pastilha com a peça.

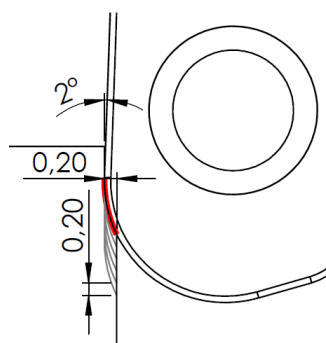


Figura 4.11: Zona de contacto da amostra 2 com a peça.

### 4.3.3 Desgaste da Ferramenta de Corte - Amostra 3

É possível visualizar a evolução do desgaste ao longo do processo de maquinagem, da ferramenta de corte - Amostra 3 - em ambas as durezas, nas Figuras 4.12 e 4.13. As imagens correspondem às passagens realizadas (indicada pelos pontos representados nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5).

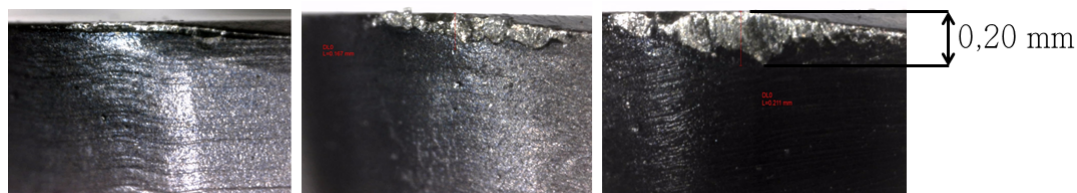


Figura 4.12: Evolução do desgaste da amostra 3 (250x) no aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro)

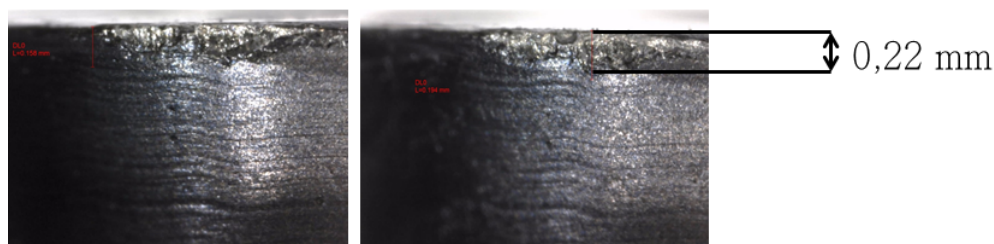


Figura 4.13: Evolução do desgaste da amostra 3 (250x) no aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro)

Contrariamente, a amostra 3 evidenciou um desgaste de flanco diferente da amostra 2. Apesar de possuírem uma geometria semelhante, a combinação do axial e do radial no suporte da ferramenta e o revestimento são diferentes. Numa fase inicial, apresentou perda de material na face alisadora, e só numa fase intermédia do processo de maquinação é que foi relevando algum desgaste no raio de ponta. Na Figura 4.14, a área a vermelho representa zona de contacto da pastilha com a peça.

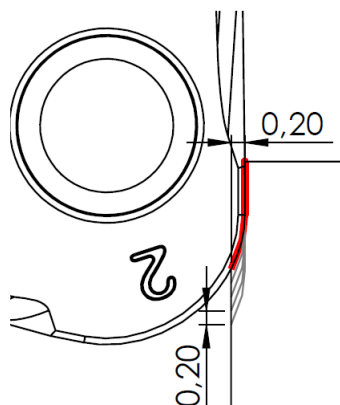


Figura 4.14: Zona de contacto da amostra 3 com a peça.

#### 4.3.4 Análise Comparativa

Finalizados os ensaios para obtenção da curva de desgaste das três ferramentas de corte (amostra 1, amostra 2 e amostra 3), o gráfico da Figura 4.15 revela os tempos de maquinação que as amostras realizaram até atingir o critério de vida adotado ( $VB_{max} = 0.2mm$ ).

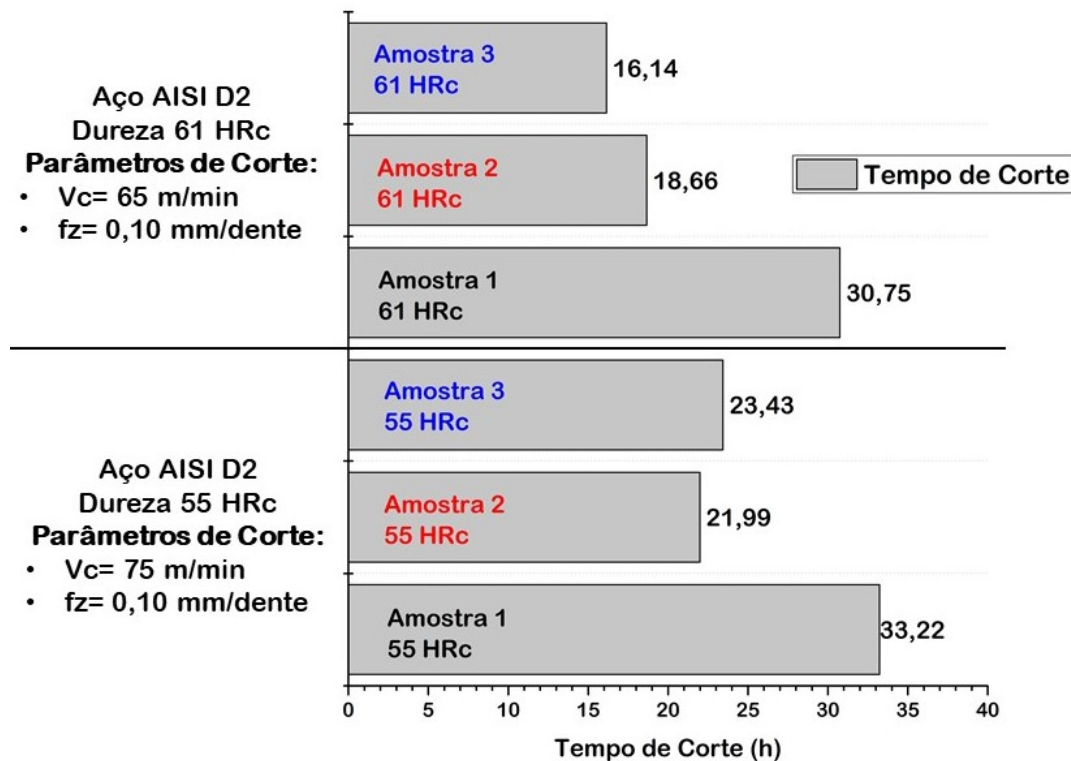


Figura 4.15: Tempos de corte de cada amostra até à obtenção do critério de vida adotado.

Na análise do gráfico da Figura 4.15, observa-se que as ferramentas de corte possuem elevados tempos de maquinagem. A justificação deve-se aos parâmetros de corte escolhidos. A seleção de velocidades de corte como 65 e 75 m/min ocorre devido ao processo de maquinagem presente, maquinagem em materiais de elevada dureza. É possível utilizar velocidades de corte mais elevadas, mas os tempos de maquinagem iriam diminuir drasticamente. Na prática industrial (na realização de moldes, por exemplo), os ciclos de maquinagem de acabamento duram na maioria dos casos intervalos de tempo da mesma ordem de grandeza dos obtidos. Pretende-se com isto diminuir ao máximo a troca das pastilhas na ferramenta de corte nestes ciclos, de forma a evitar variações dimensionais.

Estes ensaios foram realizados numa **superfície plana vertical**, e foi possível efetuar uma análise comparativa, concluindo que:

- Para a dureza de 55 HRc a amostra 1, para uma velocidade de corte de 75 m/min e um avanço de 0.10 mm/dente, apresentou um tempo de vida útil 29,47% e 33,81% superior relativamente às amostras 3 e 2, respetivamente. Para a dureza de 61 HRc, a uma velocidade de corte de 65 m/min e a um avanço de 0.10 mm/dente, a amostra 1 demonstrou um tempo de vida útil 39,32% e 47,52% superior às amostras 2 e 3, respetivamente.
- A amostra 1 e a amostra 3, para uma dureza de 55 HRc, ao final de 33 e 24 horas de maquinagem, respetivamente, não apresentaram um desgaste significativo, ou seja, o valor do VB não ultrapassou os 0.20 mm, enquanto que a amostra 2 que apenas maquinou 22 horas ultrapassou o valor pretendido do  $VB_{max}$ .

- Para a dureza de 61 HRc, todas as amostras ultrapassaram o valor de VB inicialmente proposto. Contudo, a amostra 1 foi a que melhores resultados apresentou, maquinou cerca de 31 horas, enquanto que as amostras 2 e 3 apenas maquinaram 19 e 16 horas, respetivamente.

Relativamente à geometria das amostras:

- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta pequeno ( $r_\epsilon=0.8$  mm), uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta - Amostra 1 - verifica-se um maior tempo de vida em ambas as durezas.
- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta grande ( $r_\epsilon=2.0$  mm), um chanfro e apresenta uma pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta - Amostra 2 - verifica-se elevados tempos de maquinagem, que diminuem com o aumento da dureza. A pequena inclinação em relação à parede maquinada, faz com que o desgaste se alastre ao longo do raio de ponta de forma uniforme.
- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta grande ( $r_\epsilon=2.0$  mm), uma face alisadora, um chanfro e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte da ferramenta - Amostra 3 - verifica-se um elevado tempo de maquinagem. Mas, com o aumento da dureza do aço, é relevante o aumento do desgaste na zona da face alisadora, devido às vibrações provocadas pela máquina-ferramenta, que fazem com que esta esteja sempre em contacto com a superfície maquinada e, consequentemente, o seu desgaste aumente sucessiva e abruptamente.

Comparando estes resultados com outros estudos, Fulemova and Janda [2014] afirmaram que a vida útil de uma ferramenta de corte aumenta mediante o raio de ponta, realizando a mesma operação efetuada neste projeto.

Denkena and Biermann [2014], efetuaram um estudo de fresagem no aço AISI 4140, utilizando ferramentas de corte de metal duro revestidas a PVD, para obtenção da curva de desgaste. Os autores concluíram que a ferramenta de corte com maior raio de ponta atingiu uma vida útil 70% superior à ferramenta de corte com menor raio de ponta. Acrescentadamente, descobriram que a ferramenta de corte com maior raio de ponta apresenta melhor desempenho de corte devido à elevada resistência à fratura que esta proporciona. Isso não se verificou no presente projeto, possivelmente devido ao processo de maquinagem, aço, dimensão do chanfro, preparação da aresta e ângulos axial e radial no suporte utilizados.

Ao contrário do que anteriormente foi afirmado, no presente projeto a ferramenta de corte com menor raio de ponta apresentou um tempo de maquinagem superior às ferramentas de corte com maiores raios de ponta, mesmo com o aumento da dureza do material a maquinar.

Não se pode afirmar, que se deve ao pequeno raio de ponta que a ferramenta de corte apresenta, mas sim um conjunto de outros elementos, como: face alisadora, posicionamento desta no suporte, classe de metal duro, revestimento e até, ao tipo de superfície que esta está a maquinar.

## 4.4 Avaliação da Rugosidade Superficial

Para a análise do acabamento da superfície, foram recolhidos os valores de rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), de rugosidade máxima ( $R_t$ ) e de profundidade média da rugosidade ( $R_z$ ).

Os ensaios, como referido no procedimento experimental, foram divididos em duas superfícies: plana vertical e 3D. Para os ensaios na superfície plana vertical e 3D os parâmetros de corte utilizados foram: uma velocidade de corte de 75 m/min e quatro avanços por dente, 0.05, 0.10, 0.15 e 0.20 mm/dente.

Pretende-se analisar os efeitos dos parâmetros de estudo (a dimensão do raio de ponta, a face alisadora e o chanfro) na superfície maquinada. Feita uma pequena pesquisa (Ferraresi [1970], Lacalle et al. [2005]) foi possível determinar a faixa de valores admissíveis para a rugosidade média aritmética, para um processo de fresagem numa operação de acabamento em aços endurecidos.

Ferraresi [1970] afirma que para um processo de fresagem, a faixa de valores para a rugosidade média aritmética encontra-se entre 0.8 e 6.3  $\mu m$ . Em operações de retificação, esses valores diminuem para 0.2 a 3.2  $\mu m$ . Para retificações genéricas, considera-se  $R_a = 0.8 \mu m$ . No caso de retificações mais cuidadas, considera-se um  $R_a = 0.40 \mu m$ . E em caso especiais, em que são necessárias retificações precisas, a tolerância é reduzida para  $R_a = 0.2 \mu m$ . É possível definir um valor máximo de rugosidade média aritmética de 3.2  $\mu m$ , de acordo com as mós e parâmetros utilizados. No entanto, para o presente projeto é um pouco desajustado. Definir um valor mínimo de rugosidade média aritmética menor que 0.8  $\mu m$  também não é correto, sendo até demasiado limitador, pois trata-se de um processo de fresagem de acabamento em materiais duros.

Lacalle et al. [2005] afirmam que os moldes para estampagem apresentam tolerâncias dimensionais na faixa entre os 0.05 a 0.1 mm e os moldes para injeção têm tolerâncias menores que 0.04 mm. Desta forma, as especificações de rugosidade média aritmética em moldes e matrizes, frequentemente recomendam valores inferiores a 0.6  $\mu m$ . Aquando da sua finalização, em alguns casos sofrem operações de polimento e tratamentos na superfície. O presente projeto consiste numa operação de fresagem para obtenção de um bom acabamento, pelo que, o valor definido por Lacalle et al. [2005] é inferior.

Foi então considerado que valores de rugosidade média aritmética abaixo de 1.0  $\mu m$  são valores ótimos para um processo de fresagem numa operação de acabamento em aços endurecidos.

Com as amostras 2 e 3 foi possível recolher as rugosidades correspondentes a todos os avanços. Infelizmente a amostra 1 não esteve à altura para a realização dos ensaios na superfície 3D, conforme descrito mais adiante na secção 4.4.2.

### 4.4.1 Rugosidade Superficial da Superfície Plana Vertical

Com o auxílio do equipamento *Tesa-Rugosurf 10-G* (Figura 3.15), a rugosidade média aritmética da superfície plana vertical, foi medida com o rugosímetro o mais paralelo possível ao aço, e o deslocamento do apalpador perpendicular ao movimento de corte da ferramenta.

Nos gráficos das Figuras 4.16 e 4.17, observa-se a evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente, para a dureza 55 e 61 HRC do aço AISI D2, respetivamente. Foram realizadas três medições no mesmo local do cilindro. Estas

encontram-se em Anexo nas Tabelas A.1, A.2 e A.3, da amostra 1, 2 e 3 respetivamente para a dureza de 55 HRc e nas Tabelas A.4, A.5 e A.6, da amostra 1, 2 e 3 respetivamente para a dureza de 61 HRc .

Analisando o gráfico da Figura 4.16, é possível concluir que a rugosidade média aritmética aumenta com o incremento do avanço por dente, excepto com um avanço de 0.2 mm/dente. Acresce que o comportamento das amostras 1 e 3 é semelhante neste aço, nesta dureza. Apesar de terem geometrias diferentes, estas apresentam a mesma classe de metal duro, revestimento e posicionamento no suporte da ferramenta, sendo este posicionamento uma configuração negativa/positiva.

Verifica-se, ao analisar o gráfico da Figura 4.17, que a rugosidade média aritmética não aumenta com a evolução do avanço por dente, sendo bastante irregular. Contudo, a amostra 1 demonstrou os melhores valores de rugosidade, e da forma mais uniforme. A última medição de rugosidade (com um avanço de 0.20 mm/dente) das amostras 2 e 3 pode induzir a erro, pois existem vibrações paralelas à agulha do rugosímetro. Isto fez com que este não assumisse o perfil de rugosidade esperado, como é possível visualizar nas Figuras 4.19, 4.20, 4.22.

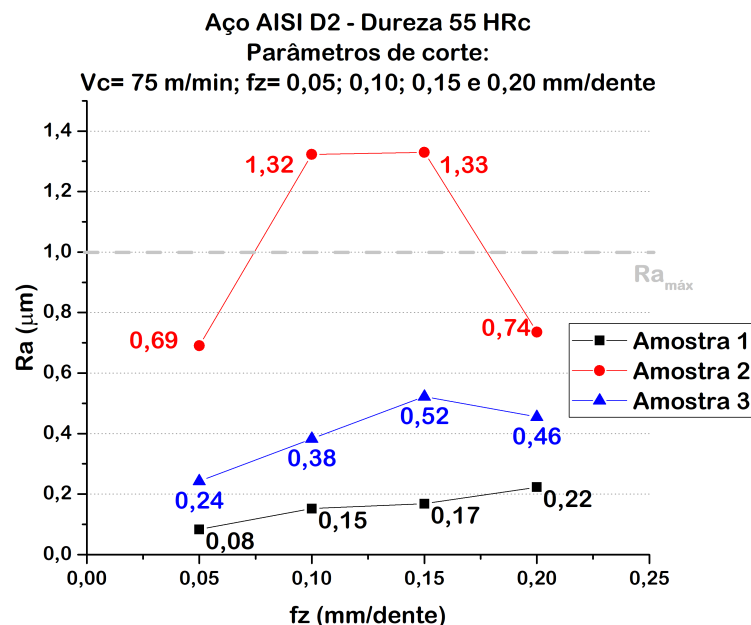


Figura 4.16: Evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente, do aço AISI D2 de dureza 55 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro)

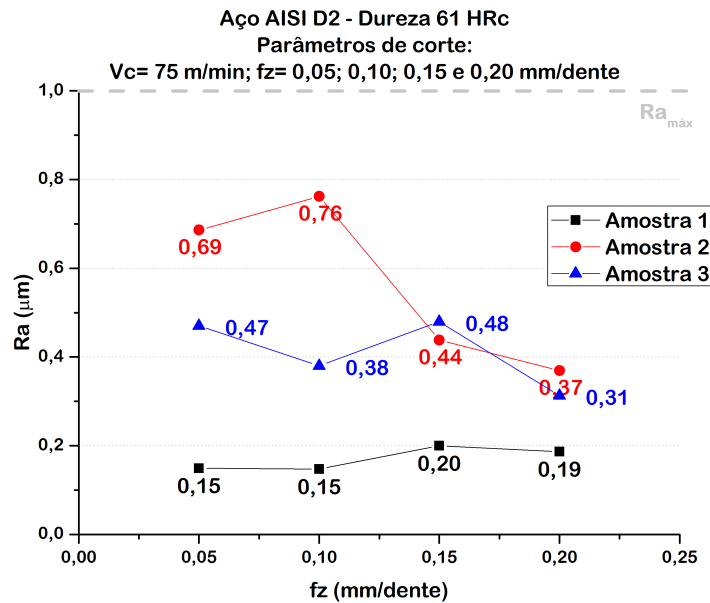


Figura 4.17: Evolução da rugosidade média aritmética (Ra) em função do avanço por dente, do aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm e face alisadora), Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro)

#### 4.4.1.1 Comportamento das Ferramentas de Corte - Dureza 55 HRc

Analisando o comportamento individual de cada amostra no aço AISI D2 para uma dureza de 55 HRc, é possível concluir:

- A amostra 1 foi a que apresentou melhores resultados, podendo-se afirmar que esta geometria se encontra preparada para maquinar superfícies planas verticais nesta dureza, obtendo resultados bastante satisfatórios (Figura 4.18).
- A amostra 2 começou por apresentar valores de rugosidade bastante elevados quando comparados com as restantes amostras e superiores ao limite proposto para o Ra. É possível visualizar estas superfícies maquinadas na Figura 4.19. Relativamente ao avanço 0.20. mm/dente, o valor de rugosidade pode não ser o correspondente à realidade, pois é possível visualizar que existe um padrão de irregularidades (estriado oblíquo) que a agulha do rugosímetro pode não ter detetado.
- A amostra 3 mostrou resultados abaixo do valor proposto para a rugosidade média aritmética (Ra), neste aço e dureza. Esta ferramenta apresenta a mesma periferia, revestimento, classe de metal duro e configuração do suporte da amostra 1, e possui o raio de ponta e chanfro da amostra 2. Isso significa que esta ferramenta, para uma velocidade de corte de 75 m/min e para os quatro avanços selecionados, pode ser utilizada para maquinar aços de elevada dureza, obtendo assim boas superfícies maquinadas. Contudo, é possível afirmar que a classe de metal duro, o revestimento e o posicionamento da pastilha no suporte, influenciam a superfície maquinada.



Assim, conclui-se que a amostra 3, desenvolvida para o âmbito do projeto curricular, está preparada para maquinar aços de dureza até 55 HRc (Figura 4.20).

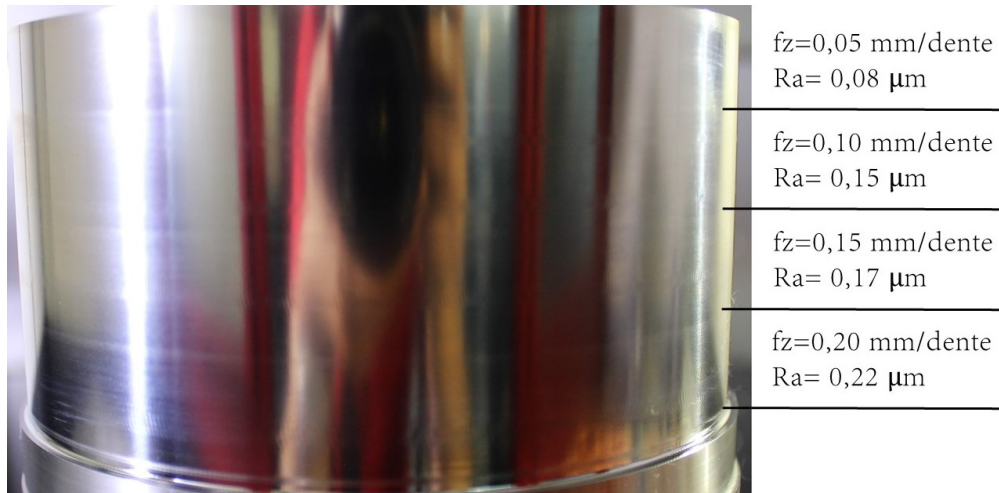


Figura 4.18: Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 55 HRc pela a Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm e face alisadora), a uma velocidade de corte de 75 m/min.

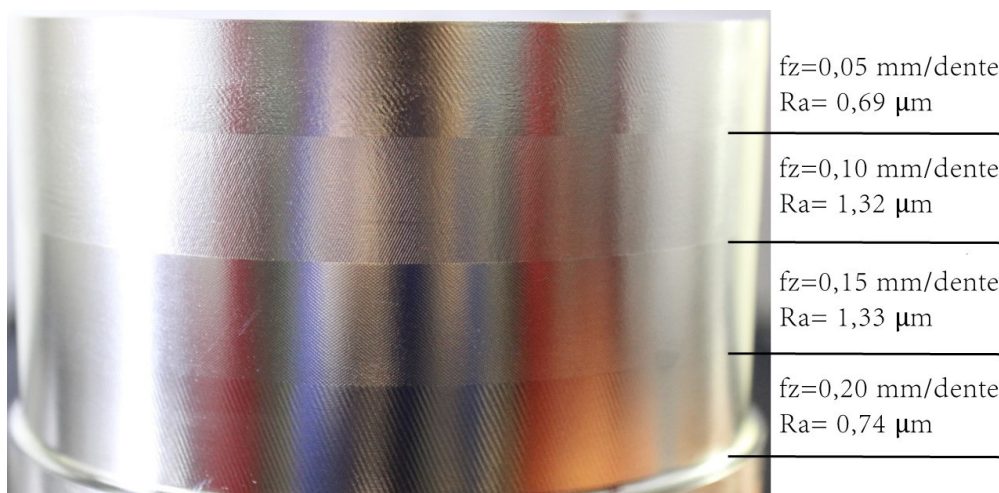


Figura 4.19: Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 55 HRc pela a Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min.



Figura 4.20: Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 55 HRc pela a Amostra 3 ( $r_e=2.0$  mm, face alisadora e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min.

#### 4.4.1.2 Comportamento das Ferramentas de Corte - Dureza 61 HRc

Analisando o comportamento individual de cada amostra no aço AISI D2 para uma dureza de 61 HRc, é possível concluir:

- A amostra 1 apresentou superfícies brilhantes em todos os avanços selecionados e com poucos efeitos de vibração, sendo que as melhores superfícies maquinadas foram com os avanços de 0.05 e 0.10 mm/dente (Figura 4.21).
- A amostra 2 apresenta a melhor superfície para um avanço de 0.15 mm/dente, sendo clara a sua distinção entre as secções (Figura 4.22).
- A amostra 3 obteve a melhor superfície maquinada com um avanço de 0.10 mm/dente (Figura 4.23) e melhores superfícies maquinadas que a amostra 2.



Figura 4.21: Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 61 HRc pela a Amostra 1 ( $r_e=0.8$  mm e face alisadora), a uma velocidade de corte de 75 m/min.

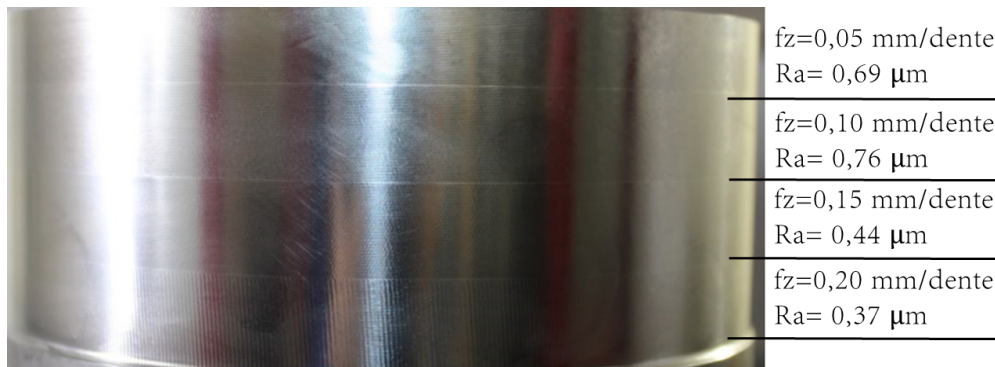


Figura 4.22: Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 61 HRc pela a Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min.

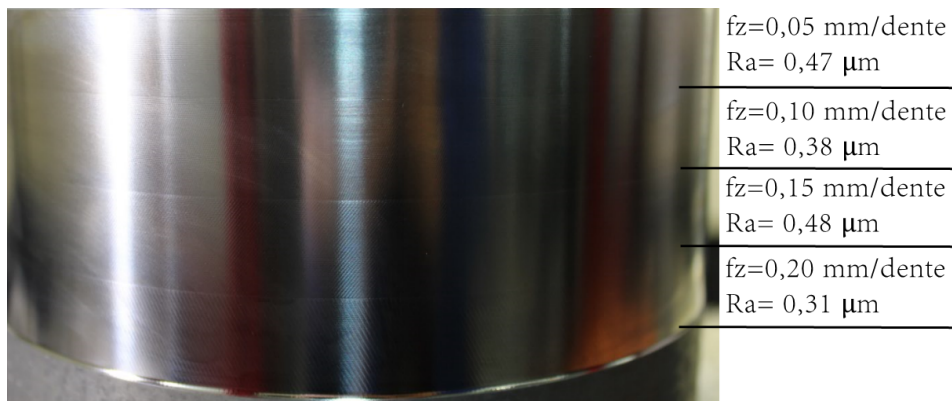


Figura 4.23: Superfícies maquinadas no aço AISI D2, em superfície plana vertical, de dureza 61 HRc pela a Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro), a uma velocidade de corte de 75 m/min.

#### 4.4.1.3 Análise Comparativa

Com a realização dos ensaios para obtenção da rugosidade da superfície maquinada **na superfície plana vertical** em diferentes durezas, foi possível concluir o seguinte:

- A amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta) obteve resultados abaixo da rugosidade média aritmética proposta, para os diferentes avanços. O desgaste da ferramenta foi contínuo e uniforme, sendo possível afirmar que esta ferramenta de corte se encontra preparada para maquinar aços de durezas superiores a 55 HRc neste tipo de superfície (plana vertical).
- A amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, um chanfro e apresenta uma pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta) piora o seu desempenho com a diminuição da dureza do material a maquinar. Apresenta rugosidades médias aritméticas superiores a  $0.48 \mu m$ , chegando a atingir um valor de  $1.33 \mu m$ . Conclui-se que, com

o aumento da dureza, com esta ferramenta de corte, o valor da rugosidade média aritmética diminui.

- A amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, uma face alisadora, um chanfro e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte da ferramenta) é uma opção para este tipo de maquinagens. Não apresenta resultados melhores que a amostra 1 mas permite ainda assim, obter boas superfícies maquinadas para durezas até 55 HRc. Esta com o aumento da dureza, aproxima-se do comportamento da amostra 2.

Relativamente às geometrias das amostras:

- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta pequeno ( $r_\epsilon=0.8$  mm), uma face alisadora na aresta principal e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte desta - Amostra 1 - verifica-se uma melhor superfície maquinada para ambas as durezas, numa operação de maquinagem em superfície plana vertical.
- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta elevado ( $r_\epsilon=2.0$  mm), um chanfro e a aresta principal de corte se encontra aliviada, quando posicionada no suporte - Amostra 2 - apresenta valores de rugosidade média aritmética superiores numa dureza de 55 HRc, diminuindo com o aumento da dureza.
- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta grande ( $r_\epsilon=2.0$  mm), uma face alisadora na aresta principal e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte - Amostra 3 - apresenta resultados satisfatórios, mas não tão bons quando comparados com a ferramenta de corte designada de amostra 1. Contudo, é indicada para maquinagens em superfícies planas verticais, em materiais de durezas superiores a 55 HRc.

#### 4.4.2 Rugosidade Superficial da Superfície 3D

Com o auxílio do rugosímetro *Tesa-Rugosurf 10-G* (Figura 3.15), mediu-se a rugosidade média aritmética da superfície 3D. Posicionou-se o equipamento de modo a que todo o deslocamento efetuado pelo apalpador estivesse sempre em contacto com o aço, como é possível visualizar na Figura 4.24.



Figura 4.24: Deslocamento efetuado pelo rugosímetro na superfície 3D

Nos gráficos das Figuras 4.25 e 4.26, observa-se a evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente, para a dureza 55 e 61 HRC do aço AISI D2. Foram realizadas três medições no mesmo local do cilindro. Estas encontram-se em Anexo nas Tabelas A.7 e A.8, da amostra 2 e 3 para a dureza 55 HRC, respetivamente, e nas Tabelas A.9 e A.10, da amostra 2 e 3, respetivamente, para a dureza 61 HRC.

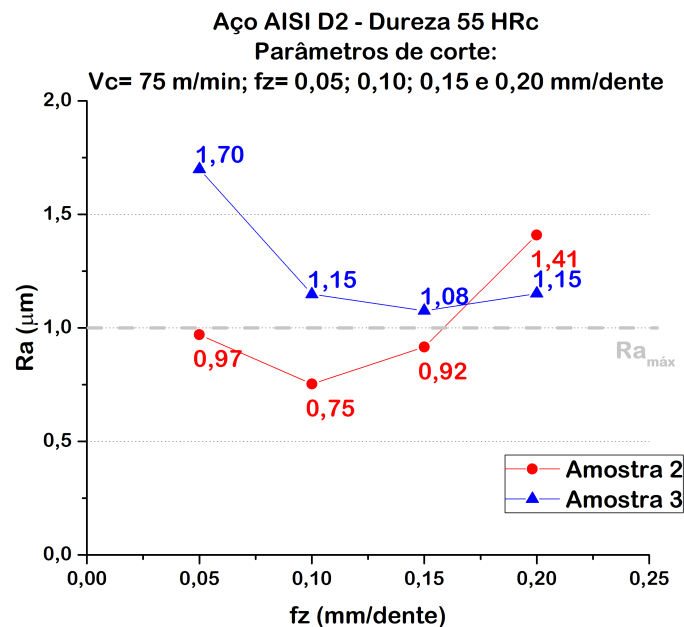


Figura 4.25: Evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente para o aço AISI D2 de dureza 55 HRC. Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro).

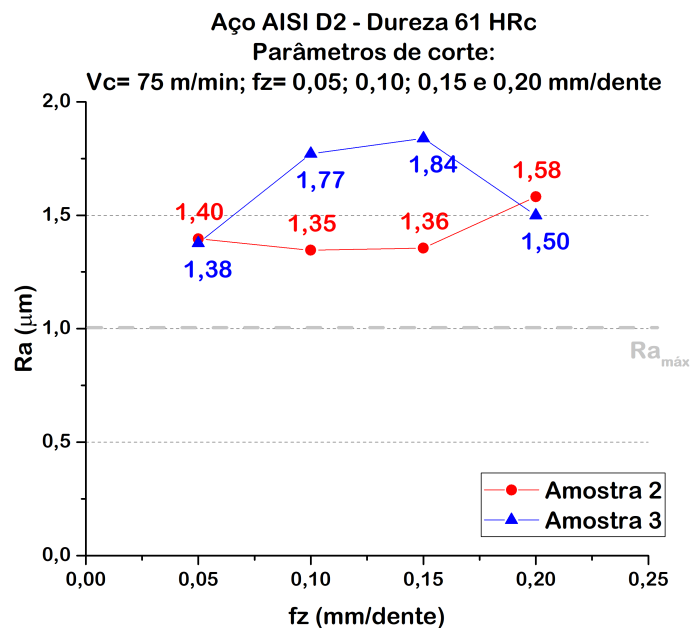


Figura 4.26: Evolução da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) em função do avanço por dente para o aço AISI D2 de dureza 61 HRc. Amostra 2 ( $r_\varepsilon = 2,0$  mm e chanfro) e Amostra 3 ( $r_\varepsilon = 2,0$  mm, face alisadora e chanfro).

A amostra 1, como referido anteriormente não efetuou os ensaios em superfície 3D até ao fim, pois:

- Trata-se de um raio muito pequeno para a profundidade de corte e largura de material a retirar (0,2 mm). É possível visualizar na Figura 4.27 o trajeto efetuado pelo raio de ponta na superfície maquinada, bem como o relevo que deixa a cada camada que percorre na superfície;
- O programa CAD realizado (espiral) pode não ser o mais aconselhável para esta geometria.



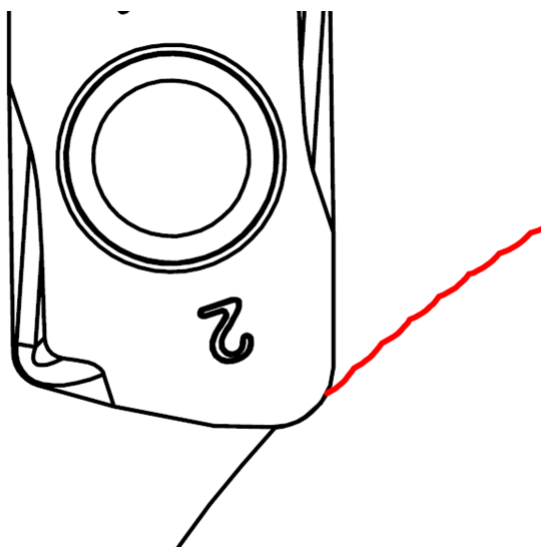


Figura 4.27: Relevo efetuado pela amostra 1 na superfície maquinada.

É possível visualizar o acabamento da superfície maquinada da amostra 1 (Figura 4.28 na dureza 55 HRc e na Figura 4.29 na dureza 61 HRc), sendo obtido para um avanço de 0.05 mm/dente, uma rugosidade média aritmética aproximadamente de 3,59  $\mu m$  e 3,68  $\mu m$  para as durezas 55 e 61 HRc, respetivamente.

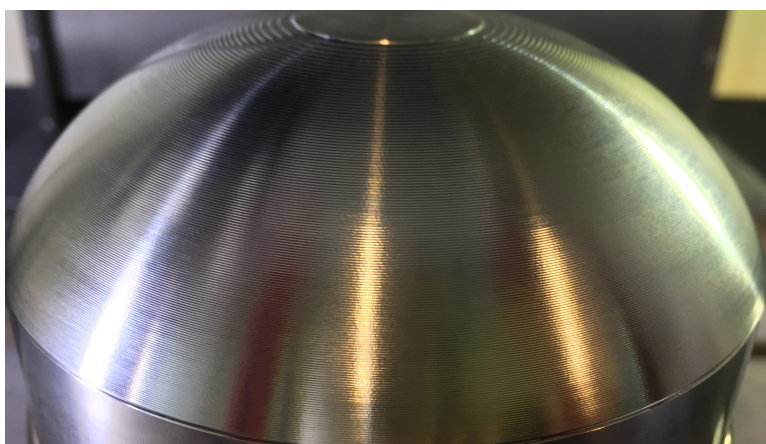


Figura 4.28: Superfície 3D maquinada pela amostra 1 na dureza 55 HRc.

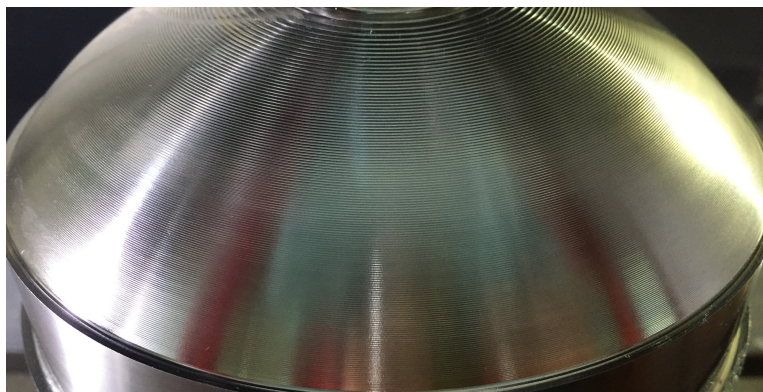


Figura 4.29: Superfície 3D maquinada pela amostra 1 na dureza 61 HRc.

Pelo contrário, as amostras 2 e 3 foram capazes de realizar estes ensaios, principalmente a amostra 2, que foi a que permitiu obter superfícies com melhor acabamento.

Relativamente à análise do gráfico da Figura 4.26 e das Tabelas 4.3 e 4.5, é possível afirmar que estas ferramentas de corte são capazes de maquinar superfícies 3D em aços de elevada dureza, contudo, para durezas superiores a 61 HRc, ambas ultrapassam o valor inicialmente proposto para o Ra.

#### 4.4.2.1 Análise da Rugosidade Superficial - Amostra 2

Analisando o comportamento individual da amostra 2 no aço AISI D2 nas durezas 55 e 61 HRc, é possível visualizar as superfícies maquinadas por esta nas Tabelas 4.2 e 4.3, para as respetivas durezas. Conclui-se que:

- Durante todo o processo de maquinagem, para uma dureza de 55 HRc, a amostra 2 cumpriu com o valor proposto de rugosidade média aritmética, excepto para o avanço de 0.20 mm/dente.
- Para uma dureza de 61 HRc, apresentou os melhores valores de rugosidade média aritmética para avanços de 0.10 e 0.15 mm/dente, no entanto, acima do valor inicialmente proposto, o que não implica que esta não seja uma boa ferramenta de corte para maquinar aços de elevada dureza.



Tabela 4.2: Representação das superfícies maquinadas da Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 55 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min.

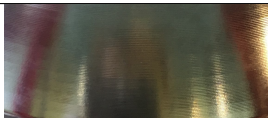
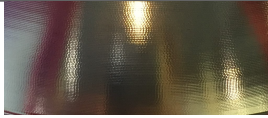

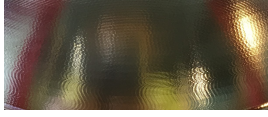
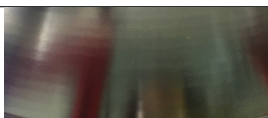
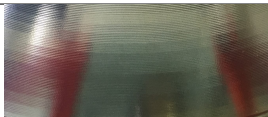
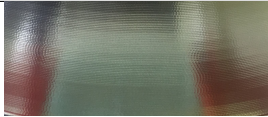
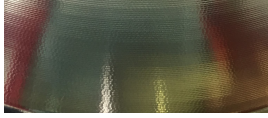
Avanço [mm/dente]	Superfície Maqui- nada	Ra [ $\mu m$ ]
0.05		0,97
0.10		0,75
0.15		0.92
0.20		1.40

Tabela 4.3: Representação das superfícies maquinadas da Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 61 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min.

Avanço [mm/dente]	Superfície Maqui- nada	Ra [ $\mu m$ ]
0.05		1,40
0.10		1,35
0.15		1,36
0.20		1,58

#### 4.4.2.2 Análise da Rugosidade Superficial - Amostra 3

Analisando o comportamento individual da amostra 3 no aço AISI D2 para as durezas 55 e 61 HRc, é possível visualizar as superfícies maquinadas por esta nas Tabelas 4.4 e

4.5, para as respetivas durezas. Pode-se concluir que:

- Para uma dureza de 55 HRc, a amostra 3 não foi bem sucedida, pois todos os valores de rugosidade média aritmética se encontram acima do valor proposto ( $Ra > 1\mu m$ ). Contudo, é possível afirmar que esta ferramenta é capaz de maquinar aços de elevada dureza, não tão bons quando comparada com a geometria anterior, mas apenas um pouco acima do limite proposto. O melhor valor de rugosidade média aritmética ocorreu para o avanço de 0.15 mm/dente.
- Do mesmo modo, para a dureza 61 HRc, a amostra 3 apresentou valores acima do valor de Ra proposto. O melhor valor de rugosidade média aritmética ocorreu para o avanço de 0.05 mm/dente. No gráfico da Figura 4.26, o valor retirado para o avanço de 0.20 mm/dente não deve ser considerado correto, pois é possível observar na Tabela 4.5, para o avanço pretendido, que a superfície maquinada demonstra vibrações paralelas ao deslocamento do apalpador do rugosímetro, que podem ter tido influência no valor retirado.

Tabela 4.4: Representação das superfícies maquinadas da Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 55 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min.

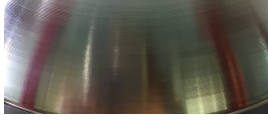


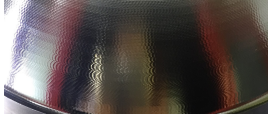


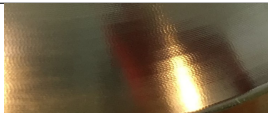
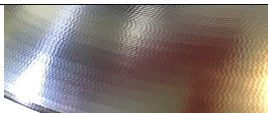
Avanço [mm/dente]	Superfície Maquinada	Ra [ $\mu m$ ]
0.05		1.69
0.10		1.14
0.15		1.07
0.20		1.15

Tabela 4.5: Representação das superfícies maquinadas da Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, face alisadora e chanfro), consoante o avanço por dente, no aço AISI D2 de dureza 61 HRc, a uma velocidade de corte de 75 m/min.

Avanço [mm/dente]	Superfície Maqui- nada	Ra [ $\mu m$ ]
0.05		1,38
0.10		1,77
0.15		1,84
0.20		1,50

#### 4.4.2.3 Análise Comparativa

Com a realização destes ensaios, de obtenção da rugosidade da superfície maquinada, **na superfície 3D**, em diferentes durezas, foi possível concluir:

- A Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta) não conseguiu maquinar este tipo de superfície, devido à profundidade de corte e largura utilizados (0.2mm), tornando-se visível o trajeto efetuado na superfície maquinada. O programa CAD (espiral) realizado pode não ter sido o mais aconselhável.
- A amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, um chanfro e apresenta uma pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta) piora o seu desempenho com o aumento da dureza do material a maquinar. Para uma dureza de 55 HRc, o valor da rugosidade média aritmética esteve dentro dos limites propostos, excepto para o avanço de 0.20 mm/dente. Aumentando a dureza do material, os valores obtidos encontraram-se todos acima do limite proposto, contudo é possível afirmar que esta geometria está preparada para realizar operações de maquinagem 3D, em aços de elevada dureza.
- Da mesma forma, a amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, uma face alisadora, um chanfro e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte da ferramenta) piora o seu desempenho com o aumento da dureza do material a maquinar. Os valores de rugosidade média aritmética encontram-se acima do valor proposto, sendo possível afirmar, que esta geometria é capaz de maquinar aços de elevada dureza, mas não apresentam valores de rugosidade média aritmética abaixo do proposto.

Relativamente às geometrias das amostras:

- A amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta) não realiza operações em superfícies 3D com bom acabamento superficial.
- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta grande ( $r_\epsilon=2.0$  mm), uma face alisadora e um alívio na aresta principal quando posicionada no suporte - Amostra 2 - obtêm-se boas superfícies maquinadas, ou seja, valores de rugosidade média aritmética abaixo do valor proposto. Contudo, aumentando a dureza e o avanço, pior são as superfícies maquinadas.
- Quando a ferramenta de corte possui um raio de ponta grande ( $r_\epsilon=2.0$  mm), um chanfro e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte - Amostra 3 - os valores de rugosidade média aritmética aumentam com o aumento da dureza do material a maquinar. Para ambas as durezas, os valores obtidos da superfície maquinada encontram-se acima do valor proposto para o Ra.

Fulemova and Janda [2014] afirmaram que o aumento do raio de ponta, diminui o valor de rugosidade da superfície maquinada. Özel et al. [2005] e Burhanuddin et al. [2011] mostraram que a preparação da aresta de corte influencia significativamente a rugosidade da superfície maquinada. Afirmam ainda que um raio de ponta elevado resulta num aumento de vibrações e esforço de corte, causando mau acabamento.

Denkena and Biermann [2014] concluíram que a preparação da aresta de corte influencia a rugosidade da superfície maquinada. Por um lado, um raio de ponta elevado resulta num maior valor da rugosidade da superfície, devido ao aumento de vibrações e esforço de corte. Por outro, o incremento do raio de ponta aumenta a estabilidade do processo de maquinagem, ou seja, aumenta a resistência mecânica desta zona, evitando fenómenos de lascamento na aresta, o que leva a um melhoramento da superfície maquinada.

Os estudos referidos apenas dizem respeito a um elemento: à variação do raio de ponta.

Para o presente projeto foram utilizadas três ferramentas de corte que apresentam diferentes combinações em estudo, desde: diferentes raios de pontas, diferentes posicionamentos das pastilhas no suporte e utilizações ou não de chanfros e faces alisadoras. Contudo o projeto mostrou que a ferramenta que apresenta um raio de ponta pequeno (Amostra 1) não executa operações de acabamento em superfícies complexas em aços de elevada dureza.

Não se pode afirmar que nesta ferramenta, é só o raio de ponta que faz com que esta não os realize, mas sim um conjunto de outros elementos, como: face alisadora, posicionamento desta no suporte, classe de metal duro, revestimento, entre outros.

Para afirmar que as ferramentas de corte designadas como Amostra 2 e 3 são boas ferramentas para maquinar superfícies complexas, é necessário salientar que são os conjuntos de elementos que estas apresentam, que faz com que isso se verifique.

## Capítulo 5

# Considerações Finais

### 5.1 Conclusões

Os ensaios de fresagem efetuaram-se utilizando provetes, de aço tratado (têmpera sob vácuo) de AISI D2, em duas durezas 55 e 61 HRc. Foram utilizadas três ferramentas de corte de metal duro revestidas por PVD, duas com *AlTiN* e outra com *TiAlN + TiN*. As três amostras foram disponibilizadas pela *Palbit*, tendo sido uma delas desenvolvida no âmbito do presente projeto curricular. A diferença entre as ferramentas de corte está na geometria. Raio de ponta, face alisadora (zona da aresta de corte com um ângulo de posição a 90°) e um chanfro (preparação da aresta negativa) são os elementos a serem estudados.

Numa primeira fase do projeto foi elaborado um levantamento geométrico de uma das ferramentas de corte (Amostra 2). Isto tinha como objetivo, obter as geometrias das amostras 1 e 2, numa só (Amostra 3). Foram utilizados diversos equipamentos de medição em âmbito industrial e modelada em *SolidWorks*. Após a conclusão da modelação, procedeu-se ao respetivo desenho técnico e suporte da ferramenta de corte.

Numa segunda fase, foram realizados os ensaios de corte. Estes foram definidos como ensaios preliminares, que tiveram como objetivo obter os parâmetros de corte ideais (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), de modo a alcançar um ensaio efetivo. Os ensaios preliminares permitiram concluir que a relação comprimento/diâmetro (L/D) da ferramenta de corte é de extrema importância numa operação de maquinagem. Inicialmente, foi utilizado um adaptador de 100 mm, que provocava excesso de vibrações na superfície maquinada. Desta forma, alterou-se o adaptador para um comprimento admissível de 60 mm.

Os ensaios efetivos foram realizados com os parâmetros de corte capazes de executar um ensaio, de modo a retirar conclusões viáveis. Estes foram divididos em dois tipos de ensaios, curtos e longos. Os primeiros visaram avaliar a influência dos parâmetros de corte no acabamento superficial em diferentes durezas de material. Os longos têm como objetivo avaliar o efeito de desgaste das três ferramentas de corte (VB).

Os ensaios curtos foram divididos em dois tipos de processo de maquinabilidade: numa superfície plana vertical e 3D. Tiveram como objetivo avaliar a influência da geometria da aresta de corte, mais concretamente, o raio de ponta, a face alisadora e o chanfro.

Da realização do trabalho experimental acima sumariado, podem ser apresentadas algumas conclusões:

### **Ensaio Efetivo e Longo: Desgaste das ferramentas - Superfície Plana Vertical**

- O desgaste de uma ferramenta aumenta com a progressão do tempo de maquinagem, mesmo com o aumento da dureza do material a maquinar.
- O desgaste de flanco apresentou ser bastante uniforme, porque foi utilizada uma profundidade de corte reduzida. Contudo, nos últimos minutos de maquinagem, em ambas as durezas, o desgaste de flanco aumentou significativamente.
- A Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta) demonstra desgaste entre o raio de ponta e a face alisadora. Para a Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, um chanfro e apresenta uma pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta) verificou-se que o desgaste ocorreu ao longo do seu raio de ponta. A Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, uma face alisadora, um chanfro e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte da ferramenta) apresentou desgaste inicialmente na face alisadora, passando para o raio de ponta.
- A ferramenta de corte que obteve os maiores tempos de corte, foi a Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta) para uma velocidade de corte de 75 m/min e um avanço de 0.1 mm/dente numa superfície plana vertical.
- A Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, uma face alisadora, um chanfro e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte da ferramenta) demonstrou ser melhor que a Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, um chanfro e apresenta uma pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta) numa dureza inferior para maquinagens em superfícies planas e verticais.

### **Ensaio Efetivo e Curto: Rugosidade na Superfície Plana Vertical**

- A rugosidade média aritmética aumenta com o incremento do avanço por dente, para uma dureza de 55 HRc.
- A Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta) foi a que melhores resultados de rugosidade média aritmética obteve para ambas as durezas, utilizando uma velocidade de corte de 75 m/min e avanços por dente de 0.05, 0.10, 0.15 e 0.20 mm/dente.
- A Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, uma face alisadora, um chanfro e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte da ferramenta) demonstrou valores de rugosidade média aritmética melhores que a Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, um chanfro e apresenta uma pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta) para uma dureza inferior. Aumentando a dureza do material a maquinar, o comportamento tornou-se semelhante ao da Amostra 2.
- Aumentando a dureza do material a maquinar, a rugosidade média aritmética torna-se bastante irregular para as Amostras 2 e 3. Contrariamente, a Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta), demonstra um aumento de rugosidade com a progressão do avanço por dente.

Para os ensaios realizados na superfície plana vertical, a ferramenta com menor raio de ponta, face alisadora e posicinada a  $90^\circ$  quando colocada no suporte da ferramenta, obteve os melhores resultados, mas alterada a superfície a maquinar para superfícies mais complexas, esta ferramenta não executa este tipo de operação.

### Ensaio Efetivos e Curtos: Rugosidade na Superfície 3D

- A rugosidade média aritmética não é constante, sendo bastante irregular com o aumento do avanço por dente.
- A Amostra 1 ( $r_\epsilon=0.8$  mm, uma face alisadora e se encontrar posicionada a  $90^\circ$  no suporte de ferramenta) não efetuou os ensaios na superfície 3D devido à sua geometria e à profundidade de corte e largura a retirar (0.2 mm), Apresentando rugosidades média aritméticas superiores a  $3 \mu m$ .
- A Amostra 2 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, um chanfro e apresenta uma pequena inclinação quando colocada no suporte da ferramenta) obteve melhores superfícies maquinadas do que a Amostra 3 ( $r_\epsilon=2.0$  mm, uma face alisadora, um chanfro e se encontra posicionada a  $90^\circ$  no suporte da ferramenta), utilizando como velocidade de corte 75 m/min e avanços por dente de 0.05, 0.10, 0.15 e 0.20 mm/dente.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Terminado o presente projeto curricular, no âmbito do estudo da geometria da aresta na ferramenta de corte, durante a fresagem de aços de elevada dureza são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros de interesse:

- Realização de ensaios, utilizando ferramentas de corte com geometrias iguais, mas constituídas por diferentes classes de metal duro.
- Realização de análises estatísticas para conhecer a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e geometria da ferramenta) no acabamento superficial.
- Averiguar o efeito do raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) da aresta da ferramenta de corte na maquinação de superfícies planas.
- Estudo da influência da preparação da aresta nas forças de corte/vibração geradas durante operações de fresagem em aços endurecidos.
- Avaliar o desempenho das ferramentas de corte quando sujeitas a tratamentos de superfície antes e após revestimento.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.



# Bibliografia

- Aslan, E.  
2005. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). *Materials and Design*, 26(1):21–27.
- Astakhov, V. P.  
2011. Definitions and Industrial Applications. In *Machining of Hard Materials*, chapter 1, Pp. 1–32. London: Springer.
- Astakhov, V. P. and J. P. Davim  
2008. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. In *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Pp. 29–57. London: Springer-Verlag London Limited.
- Bosheh, S. S. and P. T. Mativenga  
2006. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(2):225–233.
- Burhanuddin, Y., C. Hassan, C. Haron, and J. A. Ghani  
2011. The Effect of Tool Edge Geometry on Tool Performance and Surface Integrity in Turning Ti-6Al-4V Alloys. *Advanced Materials Research*, 265:1211–1221.
- Cavaleiro, A. and M. T. Vieira  
1995. Engenharia de Superfícies e Degradação e Protecção de Superfícies - Textos de Apoio às Disciplinas.
- Coromant, S.  
1996. Milling. In *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook*, Pp. 2–121. Sandvik Coromant.
- Davim, J. P.  
2005. Maquinabilidade de materiais compósitos - Análise experimental: Lição de Síntese.
- Davim, J. P.  
2008. *Princípios da Maquinagem*. Porto: Publindústria.
- Davim, J. P. and A. E. Correia  
2006. *Maquinagem a Alta Velocidade*. Porto: Publindústria.
- Davim, J. P. and L. Figueira  
2007. Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(4):625—633.
- De Lacalle, L. N. L., a. Lamikiz, M. a. Salgado, S. Herranz, and a. Rivero  
2002. Process planning for reliable high-speed machining of moulds. *International Journal of Production Research*, 40(12):2789–2809.

- Denkena, B. and D. Biermann  
2014. Cutting edge geometries. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(2):631–653.
- Deonísio, C. C. d. C.  
2004. *Estudo de Fresamento do Aço D2 Endurecido em Altas Velocidades de Corte*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Elbestawi, M., L. Chen, C. Becze, and T. El-Wardany  
1997. High-Speed Milling of Dies and Molds in Their Hardened State. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 46(1):57–62.
- Endres, W. J. and R. K. Kountanya  
2002. The Effects of Corner Radius and Edge Radius on Tool Flank Wear. *Journal of Manufacturing Processes*, 4(2):89–96.
- Fallböhmer, P., C. A. Rodríguez, T. Özel, and T. Altan  
2000. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 98(1):104–115.
- Fernández-Abia, A. I., J. Barreiro, J. Fernández-Larrinoa, L. N. López de Lacalle, A. Fernández-Valdivielso, and O. M. Pereira  
2013. Behaviour of PVD coatings in the turning of austenitic stainless steels. *Procedia Engineering*, 63(September):133–141.
- Ferraresi, D.  
1970. *Fundamentos Da Usinagem Dos Metais*. São Carlos: Blucher, Edgard.
- Fulemova, J. and Z. Janda  
2014. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry. *Procedia Engineering*, 69:565–573.
- Gaitonde, V. N., S. R. Karnik, C. H. A. Maciel, J. C. C. Rubio, and A. M. Abrão  
2016. Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel. *Materials Research*, 19(2):360–369.
- Grzesik, W.  
2008. Machining of Hard Materials. In *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Pp. 97–124. London: Springer-Verlag London Limited.
- Hashmi, S.  
2017. *Comprehensive Materials Finishing Volume 1: Finish Machining and Net-Shape Forming*. Oxford: Elsevier.
- ISO 8668-1  
1989. Tool life testing in milling. *International Standard ISO 8668-1*, Switzerland.
- Jang, D., T. Watkins, K. Kozaczek, C. Hubbard, and O. Cavin  
1996. Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. *Wear*, 194(1-2):168–173.
- Jasni, N., M. Lajis, and K. Kamdani  
2012. Tool Wear Performance of TiAlN/AlCrN Multilayer Coated Carbide Tool in Machining of AISI D2 Hardened Steel. *Advanced Materials Research*, 488-489:462–467.
- Koshy, P., R. C. Dewes, and D. K. Aspinwall  
2002. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~58 HRC). *Journal of Materials Processing Technology*, 127(2):266–273.

- Kundor, N. F., N. W. Awang, and N. Berahim  
2016. Tool Wear and Surface Roughness in Machining AISI D2 Tool Steel. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(18).
- Lacalle, D., A. Lamikiz, J. Mun, J. A. Sa, M. A. Salgado, and L. N. Lo  
2005. Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting forces. 45:727–739.
- López de Lacalle, L. N., A. Lamikiz, J. Fernández-Larrinoa, and I. Azkona  
2011. Advanced Cutting Tools. In *Machining of Hard Materials*, chapter 2, Pp. 33–86. London: Springer.
- Luz, A., C. Marcelino, C. Lacerda, É. Ribeiro, and J. Mendes  
2010. Aços Ferramenta.
- Moroni, D. C.  
2009. *Sistemas de Fixação para Fresas Integrais de Metal Duro em Centro de Usinagem C.N.C - Sistema Porta Pinça X Mandril Hidráulico*. PhD thesis, SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.
- Oliveira, A. J. D.  
2007. *Análise do desgaste de ferramentas no Fresamento com Alta Velocidade de aços endurecidos*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Özel, T., T.-K. Hsu, and E. Zeren  
2005. Effects of cutting edge geometry , workpiece hardness , feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Pp. 25:262–269.
- Palbit  
2017a. Dados Técnicos - Resolução de Anomalias de Fresagem. In *General Catalogue - Hardmetal Cutting Tools*, Pp. A – 665. Palbit S.A.
- Palbit  
2017b. Ferramentas de Fresagem - MultiFit Anti-Vibration - Adaptador. In *General Catalogue - Hardmetal Cutting Tools*, Pp. A – 173. Palbit S.A.
- Rodrigues, A. R.  
2005. *Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Saini, S., I. S. Ahuja, and V. S. Sharma  
2012. Residual Stresses, Surface Roughness, and Tool Wear in Hard Turning: A Comprehensive Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(6):583–598.
- Sandvik Coromant  
1994. *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook*.
- Smith, G. T.  
2008. *Cutting Tool Technology*. Springer-Verlag London Limited.
- Stephenson, D. A. and J. S. Agapiou  
2016. *Metal Cutting Theory and Practice*, 3<sup>o</sup> edition. Broken Sound Parkway NW: CRC Press.
- ToolingU  
2008. Milling Geometry 245.
- Wu, X., L. Li, N. He, C. Yao, and M. Zhao  
2016. Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting. *Precision Engineering*, 45:359–364.


Esta página foi intencionalmente deixada em branco.


# Anexo A

**RAMADA AÇOS**  
SPECIAL STEEL SOLUTIONS

**TRATAMENTO TÉRMICOS**

**Relatório de Ensaio Não Específico 2.2 NP EN10204**





Folha Técnica Nº **00640937**

Data de Emissão 2017-03-05 11:11:35

Nº da Requisição 77/78

Data Entrada 2017-03-03 14:53:28

<b>Cliente</b>	<b>PALBIT SA</b>		
<b>Morada</b>	<b>PALHAL-BRANCA</b>	<b>3854-908</b>	

<b>Aço</b>	<b>X 155 Cr Mo V 12</b>		
<b>Tratamento</b>	<b>TÊMPERA VÁCUO</b>		

Nº Peças	Peso	Referência	Descrição
I	32.10		PEÇA
I	31.18		PEÇA
	63.28		

	Tipo de Dureza	Dureza		Camadas	
		Min	Max	Min	Max
<b>Valores Pedidos</b>	HRC	60.0	62.0		
<b>Valores Obtidos</b>	HRC	60.0	61.0		

**Derrogações N.ºs :**

**Observações:**

**VALIDADO POR:**  
 Trat. Térmicos - Eng. Paulo Dias

D310.01/03 - Processado e impresso por computador e é válido sem assinatura

Figura A.1: Relatório de Ensaio da *Ramada Aços*.

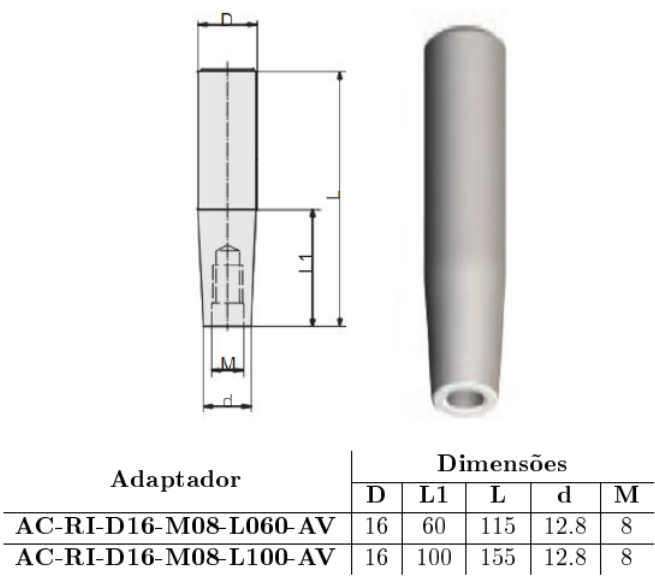


Figura A.2: Estrutura e dimensões dos adaptadores. (Palbit [2017b])

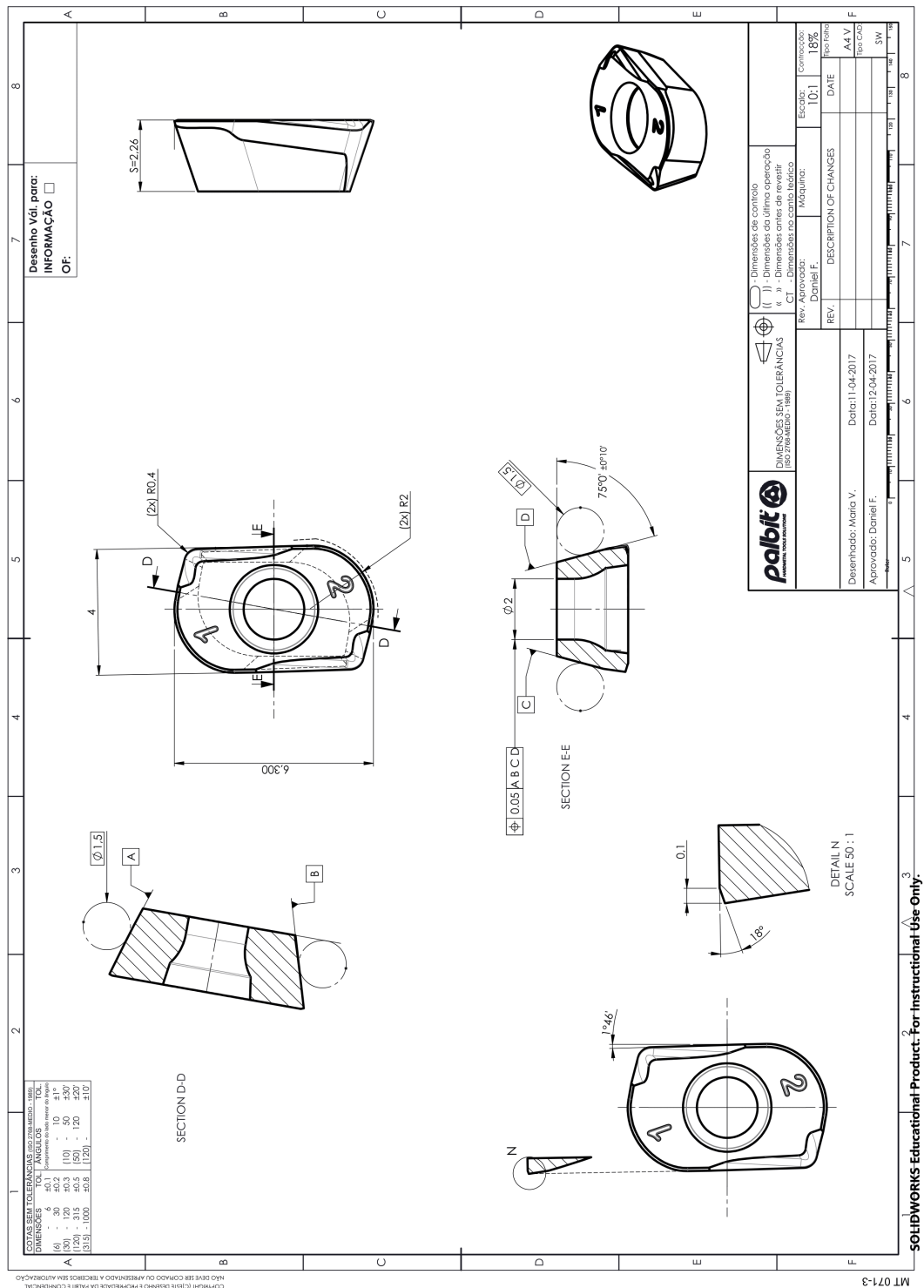


Figura A.3: Desenho técnico da amostra 3. (Apenas se encontram representadas algumas cotas devido ao acordo de confidencialidade proposto durante o decorrer do projeto curricular)

Tabela A.1: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 1 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	0.072	0.094	0.084	0.083
	Rt	0.558	0.751	0.656	0.655
	Rz	0.464	0.629	0.545	0.546
0.10	Ra	0.156	0.152	0.150	0.152
	Rt	1.066	1.028	1.130	1.074
	Rz	0.967	0.887	0.942	0.932
0.15	Ra	0.178	0.154	0.173	0.168
	Rt	1.360	1.993	1.438	1.597
	Rz	1.118	1.097	0.936	1.050
0.20	Ra	0.204	0.250	0.216	0.223
	Rt	2.017	3.156	1.106	2.093
	Rz	1.027	1.470	1.133	1.210

Tabela A.2: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc.

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	0.710	0.667	0.694	0.690
	Rt	4.349	3.827	4.029	4.068
	Rz	3.503	3.081	3.560	3.381
0.10	Ra	1.363	1.369	1.237	1.323
	Rt	7.094	7.548	6.899	7.180
	Rz	5.913	6.102	5.413	5.809
0.15	Ra	1.405	1.458	1.127	1.330
	Rt	6.936	6.930	5.640	6.502
	Rz	5.693	5.389	4.480	5.187
0.20	Ra	0.710	0.700	0.797	0.735
	Rt	4.493	4.251	4.547	4.430
	Rz	3.340	3.455	3.728	3.507



Tabela A.3: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 55 HRc.

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	0.249	0.229	0.249	0.242
	Rt	1.515	1.465	1.521	1.500
	Rz	1.310	1.289	1.282	1.293
0.10	Ra	0.438	0.338	0.372	0.382
	Rt	2.377	2.012	2.226	2.205
	Rz	2.020	1.738	1.851	1.869
0.15	Ra	0.542	0.492	0.532	0.522
	Rt	2.854	2.765	2.792	2.803
	Rz	2.606	2.325	2.414	2.448
0.20	Ra	0.499	0.436	0.430	0.455
	Rt	2.911	2.706	2.860	2.825
	Rz	2.379	2.783	2.298	2.486

Tabela A.4: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 1 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	0.144	0.157	0.147	0.149
	Rt	1.208	1.368	1.255	1.277
	Rz	0.970	1.010	0.970	0.980
0.10	Ra	0.146	0.149	0.147	0.147
	Rt	1.139	1.150	1.139	1.142
	Rz	0.861	0.844	0.870	0.858
0.15	Ra	0.190	0.208	0.202	0.200
	Rt	1.139	1.207	1.218	1.188
	Rz	0.870	1.055	1.070	0.998
0.20	Ra	0.189	0.186	0.185	0.186
	Rt	1.196	1.425	1.452	1.357
	Rz	1.055	1.030	1.035	1.040

Tabela A.5: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	0.691	0.774	0.593	0.686
	Rt	3.345	3.815	3.098	3.419
	Rz	3.089	3.421	2.799	3.103
0.10	Ra	0.624	0.962	0.700	0.762
	Rt	3.403	4.961	4.348	4.237
	Rz	3.040	4.108	3.481	3.543
0.15	Ra	0.558	0.335	0.421	0.438
	Rt	3.161	2.935	2.993	3.029
	Rz	2.723	1.858	2.388	2.323
0.20	Ra	0.370	0.394	0.344	0.369
	Rt	2.685	2.956	2.567	2.736
	Rz	2.226	2.367	2.118	2.237

Tabela A.6: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em parede com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 61 HRc

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	0.431	0.405	0.575	0.470
	Rt	2.129	1.988	2.365	2.160
	Rz	1.825	1.787	2.148	1.920
0.10	Ra	0.390	0.390	0.360	0.380
	Rt	2.327	2.267	2.057	2.217
	Rz	2.084	2.000	1.866	1.983
0.15	Ra	0.472	0.480	0.487	0.479
	Rt	2.735	2.709	2.820	2.754
	Rz	2.298	2.345	2.413	2.352
0.20	Ra	0.305	0.322	0.312	0.313
	Rt	2.024	2.161	2.132	2.105
	Rz	1.574	1.703	1.694	1.657

Tabela A.7: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 55 HRC

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	0.965	0.998	0.947	0.970
	Rt	5.297	5.508	5.642	5.482
	Rz	4.517	4.713	4.442	4.557
0.10	Ra	0.702	0.755	0.799	0.752
	Rt	5.270	4.107	4.429	4.602
	Rz	3.686	3.487	3.625	3.941
0.15	Ra	0.901	0.963	0.883	0.915
	Rt	7.095	5.881	5.366	6.114
	Rz	4.290	4.350	3.881	4.173
0.20	Ra	1.468	1.383	1.378	1.409
	Rt	7.846	8.602	9.277	8.575
	Rz	6.431	5.876	6.001	6.102

Tabela A.8: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 55 HRC

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	1.599	1.728	1.771	1.699
	Rt	8.573	9.271	9.457	9.100
	Rz	7.482	7.731	7.880	7.697
0.10	Ra	1.178	1.124	1.142	1.148
	Rt	5.634	5.579	6.056	5.756
	Rz	4.929	4.790	4.567	4.842
0.15	Ra	1.088	1.073	1.065	1.075
	Rt	5.655	5.120	5.099	5.291
	Rz	4.755	4.641	4.567	4.654
0.20	Ra	1.146	1.160	1.147	1.151
	Rt	7.272	7.142	7.338	7.250
	Rz	5.371	5.524	5.387	5.427

Tabela A.9: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 2 no aço AISI D2 de dureza 61 HRC

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	1.314	1.468	1.406	1.396
	Rt	7.817	7.978	8.086	7.960
	Rz	5.720	6.215	6.020	5.985
0.10	Ra	1.333	1.360	1.347	1.346
	Rt	6.272	6.079	6.036	6.129
	Rz	5.361	5.479	5.445	5.428
0.15	Ra	1.322	1.349	1.395	1.355
	Rt	5.827	7.085	6.457	6.456
	Rz	5.100	5.514	5.754	5.456
0.20	Ra	1.534	1.618	1.592	1.581
	Rt	7.623	8.256	7.671	7.850
	Rz	6.449	6.865	6.468	6.594

Tabela A.10: Parâmetros de rugosidade obtidos nos ensaios em superfície 3D com a Amostra 3 no aço AISI D2 de dureza 61 HRC

Avanço [mm/dente]	Critérios Rugosidade [ $\mu m$ ]	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Média
0.05	Ra	1.307	1.411	1.415	1.377
	Rt	7.606	8.494	7.972	8.024
	Rz	5.676	6.300	6.327	6.101
0.10	Ra	1.753	1.775	1.785	1.771
	Rt	8.155	7.942	8.025	8.040
	Rz	7.397	7.186	7.182	7.255
0.15	Ra	1.864	1.877	1.777	1.839
	Rt	10.29	9.328	9.190	9.602
	Rz	7.752	7.803	7.405	7.653
0.20	Ra	1.500	1.531	1.469	1.500
	Rt	6.904	7.349	7.070	7.107
	Rz	5.776	5.541	6.087	5.801